



Universidad de Valparaíso
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

“Aplicación de Fibra Sintética Forta-Fi en la Confección de Mezcla Asfáltica en Caliente para Postergar la Aparición de Grietas por Reflexión en Recapados Asfálticos”

Por

Cristofer Alessandro Madrid Fuenzalida

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: Guillermo Brante Lara

Diciembre, 2021

Índice de Contenidos

Capítulo 1: Introducción	13
1.1. Introducción General	13
1.2 Planteamiento del Problema	14
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo General	17
1.3.2 Objetivos Específicos	17
1.3.3 Resultados Esperados	17
1.4 Alcances del Trabajo de Título	17
1.5 Estructura del Trabajo de Título	18
Capítulo 2: Marco Teórico	19
2.1 Pavimentos	19
2.1.1 Definición de Pavimentos	19
2.1.2 Componentes de un Pavimento	20
2.2 Tipos de Pavimentos	21
2.2.1 Pavimentos Flexibles	21
2.2.2 Pavimentos Semi-rígidos	21
2.2.3 Pavimentos Rígidos	21
2.2.4 Pavimentos Articulados	21
2.2.5 Partes de un Pavimento Flexible	22
2.3 Tipos de Fallas en Pavimentos Flexibles (Mezclas Asfálticas)	23
2.3.1 Fisuras y Grietas	23
2.3.1.1 Fisuras y Grietas por Fatigamiento	23
2.3.1.2 Fisuras y Grietas en Bloque	24
2.3.1.3 Grietas de Borde	24
2.3.1.4 Fisuras y Grietas Longitudinales y Transversales	24
2.3.1.5 Fisuras y Grietas Reflejadas (Fisuras por Reflexión)	25
2.3.1.6 Ensayo para Medir la Resistencia a la Fisuración y Agrietamiento en Mezclas Asfálticas	28
2.3.2 Deterioro Superficial	30
2.3.3 Otros Deterioros	30
2.4 Tipos de Asfaltos Usados en Chile	31
2.4.1 Clasificación de los Asfaltos para Pavimentos	33
2.4.1.1 Cementos Asfálticos	33
2.4.1.2 Asfaltos Cortados	33
2.4.1.3 Emulsiones Asfálticas	34
2.5 Mezclas Asfálticas	35
2.5.1 Tipos de Mezclas Asfálticas	36
2.5.1.1 Mezclas Asfálticas en Caliente	36
2.5.1.2 Mezcla Asfáltica en Frío	37

2.5.2	Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente	37
2.5.2.1	Densidad	37
2.5.2.2	Vacíos de Aire	38
2.5.2.3	Vacíos en el Agregado Mineral (VAM)	39
2.5.2.4	Contenido de Asfalto	41
2.5.3	Mezclas Asfálticas Modificadas	42
2.6	Las Fibras	44
2.6.1	Definición y Tipos de Fibras	44
2.6.2	Las Fibras en Mezclas Asfálticas	45
2.6.3	Fibra FORTA-FI de Forta Corporation	46
2.7	Recapado Asfáltico	47
2.7.1	Criterios Básicos de Diseño para Reposición de Pavimento (Recarpeteo)	47
2.7.1.1	<i>Diagnóstico</i>	48
2.7.1.2	<i>Consideraciones Importantes para el Diseño de Recarpeteos</i>	50
2.7.1.3	<i>Evaluación de Pavimento Existente</i>	52
2.7.2	Recapado Asfálticos sobre Pavimentos Asfálticos	54
2.7.2.1	<i>Factibilidad Técnica</i>	54
2.7.2.2	<i>Reparaciones Previas</i>	54
2.7.2.3	<i>Espesor del Recapado</i>	55
2.7.2.4	<i>Espesores de Recapado Usando Medidas de Deflexiones</i>	58
2.7.3	Recapado Asfáltico sobre Pavimentos de Hormigón	59
2.7.3.1	<i>Factibilidad Técnica</i>	59
2.7.3.2	<i>Reparaciones Previas</i>	59
2.7.3.3	<i>Espesor de Recapado</i>	60
Capítulo 3:	Metodología	62
3.1	Fases del Trabajo de Título	62
3.2	Procedimiento de Metodología de Trabajo	64
3.3	Procedimiento de Diseño de la Mezcla Asfáltica	67
3.3.1	Granulometría	67
3.3.2	Dispersión de FORTA-FI	67
3.3.3	Determinación de Densidad	67
3.3.4	Propiedades Marshall: Estabilidad y Fluencia	68
3.3.5	Ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta	69
3.3.6	Módulo de Rigidez	70
3.3.7	Módulo Resiliente Diametral para Mezclas Asfálticas	71
3.3.8	Prueba de Flexión Semicircular (SCB) a Temperatura Intermedia	73
3.3.8.1	Método Superpave (Compactador Giratorio)	74
3.3.9	Método de Extracción de Testigos	74
Capítulo 4:	Experiencia en Laboratorio	75
4.1	Caracterización de los Materiales Constituyentes	75
4.1.2	Caracterización de los Áridos	77
4.1.3	Caracterización de la Fibra FORTA-FI	80

4.2 Ensayos en Laboratorio Realizados a las Mezclas con y sin Fibra	82
4.2.1 Granulometría de Áridos	83
4.2.2 Densidad por Método Marshall	85
4.2.3 Estabilidad y Fluencia Marshall	87
4.2.3.1 Estabilidad Marshall	87
4.2.3.2 Fluencia Marshall	90
4.2.4 Tracción Indirecta a 25°C	92
4.2.5 Módulo de Rigidez	95
4.2.6 Módulo Resiliente Diametral para Mezclas Asfálticas	97
4.2.7 Prueba de Flexión Semicircular (SCB) a Temperatura Intermedia	100
4.3 Cancha de Prueba (Camino de Prueba)	101
4.3.1 Ubicación Cancha de prueba	101
4.3.2 Toma de Muestras (Testigos) en Camino de Prueba	103
4.3.3 Evaluación de Testigos	103
4.3.3.1 Densidad de Testigos	105
4.3.3.3 Prueba de Flexión Semicircular (SCB) a Temperatura Intermedia	107
Capítulo 5: Análisis de Resultados	114
5.1 Análisis y Comparaciones	114
5.2 Conclusiones y Recomendaciones	116
Referencias	118
Capítulo 6: Anexos	120
6.1 Anexo 1: Trabajo en Laboratorio	120

Índice de Figuras.

FIGURA 1.1 - FISURACIÓN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES. FUENTE [6].	14
FIGURA 1.2- FISURA BAJO UN RECAPADO ASFÁLTICO. FUENTE [8].	15
FIGURA 1.3 - DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS SIN Y CON FIBRA FORTA-FI. FUENTE [9].	16
FIGURA 2.1 - DISTRIBUCIÓN DE LAS CAPAS ESTRUCTURALES DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE. FUENTE [13].	20
FIGURA 2.2 - ESTRUCTURA Y DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN PAVIMENTO ASFÁLTICO. FUENTE [1].	22
FIGURA 2.3- FALLA TIPO PIEL DE COCODRILO. FUENTE [14].	23
FIGURA 2.4- FISURACIÓN INDUCIDA POR TRÁFICO, MOVIMIENTOS VERTICALES. FUENTE [15].	25
FIGURA 2.5 - FISURACIÓN INDUCIDA POR TRÁFICO, MOVIMIENTOS VERTICALES. FUENTE [15].	26
FIGURA 2.6 - TIPOS DE FATIGA POR REFLEXIÓN. FUENTE [15].	26
FIGURA 2.7- CICLO TÍPICO DE LA REFLEXIÓN DE GRIETAS. FUENTE [16].	27
FIGURA 2.8 - PARÁMETRO DE MEDICIÓN DE GRIETAS. FUENTE [17].	27
FIGURA 2.9- DIFERENTES GEOMETRÍAS DE PROBETAS. FUENTE [18].	29
FIGURA 2.10- PROCESO DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO. FUENTE [21].	31
FIGURA 2.11 - TRANSMISIÓN DE CARGAS SOBRE UN PAVIMENTO FLEXIBLE. FUENTE [10].	35
FIGURA 2.12- DISTRIBUCIÓN DE VOLÚMENES PAVIMENTO ASFÁLTICO. FUENTE [23].	40
FIGURA 2.13- PROCESO MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON CAUCHO. FUENTE [21].	43
FIGURA 3.1 - METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	64
FIGURA 3.2 - MAQUINA MARSHALL LABORATORIO DE VIALIDAD.	68
FIGURA 3.3- BAÑO DE AGUA Y MORDAZA LOTTMAN.	69
FIGURA 3.4 - PRUEBA DE FLEXIÓN SEMICIRCULAR (SCB) A TEMPERATURA INTERMEDIA. FUENTE [19].	73
FIGURA 4.1- TRABAJO EN LABORATORIO.	78
FIGURA 4.2 - CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA FORTA-FI.	80
FIGURA 4.3 - DISPERSIÓN Y FIBRA EN MEZCLA.	80
FIGURA 4.4 - INSTRUMENTOS Y BRIQUETAS CONFECCIONADAS EN LABORATORIO.	82
FIGURA 4.5 - BANDA IV-A-12 VERSUS GRANULOMETRÍA OBTENIDA.	84
FIGURA 4.6 - PROMEDIO DENSIDAD MARSHALL.	85
FIGURA 4.7- DENSIDAD MARSHALL.	86
FIGURA 4.8 - ENSAYO ESTABILIDAD Y FLUENCIA EN PRENSA MARSHALL.	87
FIGURA 4.9 – GRÁFICO DE TENDENCIAS ESTABILIDAD MARSHALL.	88
FIGURA 4.10 – ESTABILIDAD MARSHALL PROMEDIO.	89
FIGURA 4.11- FLUENCIA MARSHALL PROMEDIO.	90
FIGURA 4.12- CABEZAL DE RUPTURA LOTTMAN.	92
FIGURA 4.13 - TRACCIÓN INDIRECTA PROMEDIO.	93
FIGURA 4.14- TSR o IRC %.	93
FIGURA 4.15 - FISURA ENSAYO TRACCIÓN INDIRECTA.	94
FIGURA 4.16 – GRÁFICO TENDENCIAS MÓDULO DE RIGIDEZ.	95
FIGURA 4.17 - MÓDULO DE RIGIDEZ PROMEDIO (E) EN MPA.	96
FIGURA 4.18 - MÓDULO RESILIENTE EN MPA.	98
FIGURA 4.19- GRÁFICO DE TENDENCIAS MÓDULO RESILIENTE.	98
FIGURA 4.20- COEFICIENTE ESTRUCTURAL V/S COEFICIENTE ESTRUCTURAL RECOMENDADO.	100
FIGURA 4.21 - TRABAJOS DE RECAPADO CON Y SIN FIBRA.	102
FIGURA 4.22 - TEMPERATURA Y DISPERSIÓN EN OBRA.	102
FIGURA 4.23 - ACONDICIONAMIENTO GEOMÉTRICO SEGÚN NORMA D8044-16.	104
FIGURA 4.24 - DENSIDAD MARSHALL.	106
FIGURA 4.25 - ENSAYO SCB LABORATORIO REGIONAL DE VIALIDAD.	107
FIGURA 4.26 - FALLA TESTIGO.	108
FIGURA 4.27 - PROMEDIO CARGA MÁX. V/S PROFUNDIDAD DE MUESCA.	109
FIGURA 4.28 – PROMEDIO DEFORMACIONES V/S PROFUNDIDAD DE MUESCA.	110
FIGURA 4.29 – CURVA ESFUERZO V/S DEFORMACIÓN POR PROFUNDIDAD DE MUESCA.	110

FIGURA 4.30 - PROMEDIO ENERGÍA DE DEFORMACIÓN V/S PROFUNDIDAD DE MUESCA.....	112
FIGURA 4.31 - CAMBIO ENERGÍA DE DEFORMACIÓN POR PROFUNDIDAD DE MUESCA (KJ/M).....	112
FIGURA 5.1 – PROBETA ENSAYADA A TRACCIÓN INDIRECTA CON Y SIN FORTA-FI.....	115
FIGURA 6.1 - TAMIZADO.....	124
FIGURA 6.2- 1100 DE AGREGADO MINERAL.....	125
FIGURA 6.3 - MEZCLA EN LABORATORIO.....	125
FIGURA 6.4 - PROBETAS CONFECCIONADAS EN LABORATORIO.....	125
FIGURA 6.5 - PASADO DE PROBETAS.....	126
FIGURA 6.6 - MARLOTIA BAÑO DE AGUA.....	126
FIGURA 6.7 - ENSAYO MARSHALL.....	127
FIGURA 6.8 – FIBRA EN BRIQUETA.....	127
FIGURA 6.9 - ENSAYO TRACCIÓN INDIRECTA.....	128
FIGURA 6.10 - PROBETA ENSAYADA.....	128
FIGURA 6.11 - FALLA PROFETA.....	129
FIGURA 6.12 - TESTIGOS DE OBRA.....	129
FIGURA 6.13 - ASERRADO TESTIGOS.....	130
FIGURA 6.14 - ENSAYO SCB.....	130

Índice de Tablas

TABLA 2.1- CLASIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS SEGÚN GRANULOMETRÍA. FUENTE [23].	36
TABLA 2.2 - MÍNIMO PORCENTAJE DE VAM EN RELACIÓN AL TAMAÑO MÁXIMO DE LAS PARTÍCULA. FUENTE [23].	39
TABLA 2.3 - ALGUNAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL KEVLAR.	46
TABLA 2.4 - FACTORES DE EQUIVALENCIA A UTILIZAR. FUENTE [28].	51
TABLA 2.5 - FALLAS Y REPARACIONES PREVIAS. FUENTE [28].	54
TABLA 2.6 - COEFICIENTE ESTRUCTURAL RECOMENDADO PARA PAVIMENTOS EXISTENTES. FUENTE [28]	57
TABLA 2.7- TIPO DE FALLAS Y SUS REPARACIONES. FUENTE [28].	59
TABLA 2.8- FACTORES DE CONVERSIÓN ESPESOR EXISTENTE A ESPESOR EFECTIVO. FUENTE [28].	60
TABLA 3.1- PLAN EXPERIMENTAL.	65
TABLA 3.2- PLAN EXPERIMENTAL ENSAYO DE FISURACIÓN.	66
TABLA 3.3- PLAN DE EVALUACIÓN DE TESTIGOS.	66
TABLA 4.1 - ANTECEDENTES DE DISEÑO DEL CONCRETO ASFÁLTICO.	75
TABLA 4.2 - ESPECIFICACIONES PARA LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS SEGÚN SU GRADO DE VISCOSIDAD. FUENTE [23].	76
TABLA 4.3 - GRANULOMETRÍA DE ÁRIDOS SEMI-DENSA. FUENTE [12]	77
TABLA 4.4 - DOSIFICACIÓN PROBETAS MARSHALL A 75 GOLPES.	77
TABLA 4.5 - DOSIFICACIÓN PROBETAS SUPERPAVE (COMPACTADOR GIRATORIO).	78
TABLA 4.6 - GRANULOMETRÍA.	78
TABLA 4.7 - CONSTANTES FÍSICAS.	79
TABLA 4.8 - PROPIEDADES FÍSICAS PRINCIPALES DE LA FIBRA FORTA-FI. FUENTE [26].	81
TABLA 4.9- GRANULOMETRÍA PARA MEZCLAS CONTROL Y CON FIBRA FORTA-FI.	83
TABLA 4.10 - CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS.	83
TABLA 4.11- DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR MÉTODO MARSHALL.	85
TABLA 4.12 - ESTABILIDAD MARSHALL CON Y SIN FIBRA FORTA-FI.	87
TABLA 4.13 - FLUENCIA CON Y SIN FORTA-FI.	90
TABLA 4.14 - TRACCIÓN INDIRECTA PROMEDIO DE PROBETAS MARSHALL A 25 °C.	92
TABLA 4.15 - MÓDULO DE RIGIDEZ PROMEDIO DE PROBETAS MARSHALL A 25 °C.	95
TABLA 4.16 - MÓDULO RESILIENTE PROMEDIO DE PROBETAS MARSHALL EN MPA.	97
TABLA 4.17 - COEFICIENTE ESTRUCTURAL PROMEDIO CON Y SIN FORTA-FI.	99
TABLA 4.18 - COEFICIENTE ESTRUCTURAL PARA CAPAS DE PAVIMENTO M.C. FUENTE [28].	99
TABLA 4.19- CANTIDAD DE TESTIGOS.	103
TABLA 4.20 - TESTIGOS DE OBRA.	103
TABLA 4.21 - DENSIDAD TESTIGOS.	105
TABLA 4.22 - DENSIDAD PROBETAS VS TESTIGOS.	105
TABLA 4.23 - CARGAS MÁX. Y DEFORMACIONES POR PROFUNDIDAD DE MUESCA.	109
TABLA 4.24 - ENERGÍA DE DEFORMACIÓN A LA FALLA (J).	111
TABLA 4.25- PROMEDIO ENERGÍA DE DEFORMACIÓN POR PROFUNDIDAD DE MUESCA.	111
TABLA 4.26 - TASA DE LIBERACIÓN DE ENERGÍA DE DEFORMACIÓN CRÍTICA CON Y SIN FORTA-FI.	113
TABLA 5.1 - RESULTADOS PROBETAS.	114
TABLA 5.1 - RESULTADOS TESTIGOS CON Y SIN FIBRA.	115
TABLA 6.1- DENSIDAD MARSHALL PROBETAS CONTROL.	120
TABLA 6.2- TRACCIÓN INDIRECTA PROBETAS CONTROL EN CONDICIÓN SATURADA.	120
TABLA 6.3- TRACCIÓN INDIRECTA PROBETAS CONTROL EN CONDICIÓN SECA.	120
TABLA 6.4 - DENSIDAD MARSHALL PROBETAS 0,025 % FORTA-FI.	121
TABLA 6.5 - TRACCIÓN INDIRECTA 0,025% FORTA-FI PROBETAS EN CONDICIÓN SATURADA.	121
TABLA 6.6 - TRACCIÓN INDIRECTA 0,025% FORTA-FI PROBETAS EN CONDICIÓN SECA.	121
TABLA 6.7 - DENSIDAD MARSHALL PROBETAS 0,05 % FORTA-FI.	122
TABLA 6.8 - TRACCIÓN INDIRECTA 0,05% FORTA-FI PROBETAS EN CONDICIÓN SATURADA.	122
TABLA 6.9 - TRACCIÓN INDIRECTA 0,05% FORTA-FI PROBETAS EN CONDICIÓN SECA.	122
TABLA 6.10 - DENSIDAD MARSHALL PROBETAS 0,075 % FORTA-FI.	123

TABLA 6.11 - TRACCIÓN INDIRECTA 0,075% FORTA-FI PROBETAS EN CONDICIÓN SATURADA.....	123
TABLA 6.12 - TRACCIÓN INDIRECTA 0,075% FORTA-FI PROBETAS EN CONDICIÓN SECA.....	123

Índice de Ecuaciones.

ECUACIÓN 2.1- CAPACIDAD ESTRUCTURAL DEL RECAPADO A COLOCAR.....	52
ECUACIÓN 2.2- VIDA ÚTIL REMANENTE (%).	53
ECUACIÓN 2.3 - NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO.	53
ECUACIÓN 2.4 - NÚMERO ESTRUCTURAL DEL RECARPETEO.....	55
ECUACIÓN 2.5 - ESPESOR DE RECARPETEO (MM).	58
ECUACIÓN 2.6 - DEFLEXIÓN DE PAVIMENTO MEDIDO CON VIGA BENKELMAN (MM).....	61
ECUACIÓN 2.7 - NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO DEL PAVIMENTO EXISTENTE.....	61
ECUACIÓN 3.1 - RESISTENCIA A LA TENSIÓN INDIRECTA, EN KPA.	69
ECUACIÓN 3.2 - ÍNDICE DE RESISTENCIA CONSERVADA.....	69
ECUACIÓN 3.3 - MÓDULO DE RIGIDEZ (MPA).....	70
ECUACIÓN 3.4- MÓDULO RESILIENTE DE ELASTICIDAD INSTANTÁNEO (MPA).	71
ECUACIÓN 3.5 - COEFICIENTE DE POISSON INSTANTÁNEO.	71
ECUACIÓN 3.6 - MÓDULO RESILIENTE DE ELASTICIDAD TOTAL (MPA).	71
ECUACIÓN 3.7 - COEFICIENTE DE POISSON TOTAL.	71
ECUACIÓN 3.8 - RESISTENCIA A LA TRACCIÓN S_t	72
ECUACIÓN 4.1 – COEFICIENTE ESTRUCTURAL.	97
ECUACIÓN 4.2 – COEFICIENTE ESTRUCTURAL.	97
ECUACIÓN 4.3 - TEMPERATURA DE GRADO DE RENDIMIENTO INTERMEDIO.	108
ECUACIÓN 4.4 - TASA DE LIBERACIÓN DE ENERGÍA.	113

Glosario

Aglomerantes: Son materiales, generalmente pétreos blandos, que mezclados con agua se hacen plásticos, formando pasta y que al secarse alcanzan resistencia mecánica, se utilizan para unir o pegar.

Ahuellamiento: Deformación longitudinal, en forma de huella, producida por el tránsito vehicular.

Álcalis: Sustancia química que se puede disolver en agua, combinarse con ácidos para formar sales y hacer que el ácido reduzca su nivel de acidez.

Alginato: Es un polisacárido aniónico presente ampliamente en las paredes celulares de las algas marinas y algunas especies bacterianas. Estas sustancias corresponden a polímeros orgánicos derivados del ácido algínico.

Aniónica: Que posee carga negativa, es decir mayor cantidad de electrones.

Aramid: Aramida, es una abreviación del término "aromatic polyamide", fibra sintética, robusta y muy resistente.

Áridos: Materiales naturales rocosos como las arenas o las gravas.

Aromatic polyamide: Poliamida aromática, Aramid o Aramida, fibra sintética, robusta y resistente.

Azlon: Es una fibra textil sintética compuesta de material proteico derivado de fuentes naturales como la soja, maíz, etc, Actualmente se usa en ropa.

Baches: Hoyo o desnivel del pavimento en una carretera, calle o camino.

Balizado: En topografía, es usado para referirse a la acción de ubicar un sitio en relación a otros.

Bitumen: Es una mezcla de sustancias orgánicas altamente viscosa, negra.

Briquetas: Probeta, testigo, cilindro o núcleo.

Catiónica: Que posee carga positiva, es decir mayor cantidad de protones.

Celulosa: La celulosa es un polisacárido compuesto exclusivamente de moléculas de glucosa, contiene desde varios cientos hasta varios miles de unidades de β -glucosa.

Centistokes: Unidad de medida de viscosidad cinemática de un fluido en el sistema cegesimal, equivale a la centésima parte de un Stokes.

Concreto hidráulico: El cemento o concreto hidráulico es un tipo de pavimento construido en concreto que tiene la capacidad de absorber el esfuerzo y distribuirlo en el suelo como si fueran losetas.

Corporation: Corporación, organismo oficial constituido por un conjunto de personas que se reúnen para decidir asuntos científicos, económicos, etc.

Cut-Backs: Es un asfalto líquido, se compone de cemento asfáltico y un solvente volátil.

Deflectómetro de Impacto: Es un equipo utilizado para la evaluar el estado estructural de un pavimento.

Deslumbramientos: Es un fenómeno de la visión que produce molestia o disminución en la capacidad de diferenciar objetos, debido a una inadecuada distribución lumínica.

Disgregación: Se refiere a una rotura o separación más íntima de las partes que componen un todo.

Emulsiones asfálticas: Son micro dispersiones de cemento asfáltico en agua, más un agente emulsificador el cual actúa como estabilizador del sistema, otorgándole además, una polaridad.

Exudación: Es un deterioro en la superficie de una mezcla asfáltica producto del ascenso de asfalto de la mezcla, combinado con finos del agregado que la compone.

Filler: Polvo mineral utilizado para entregar mayor consistencia a mezclas asfálticas.

Finisher: Finalizador de asfalto, pavimentadora, equipo utilizado para colocar asfalto en carreteras u otros lugares similares.

Fluidificante: son aditivos, comúnmente llamados reductores de agua.

Fog Seal: Riegos negros, es una aplicación ligera de un asfalto líquido sobre una carpeta antigua con el fin de rejuvenecerla y sellar pequeñas grietas y poros superficiales.

Gálibo: Término que designa las dimensiones máximas o mínima, tanto de altura como de anchura, que pueden tener todos los vehículos, margen de seguridad.

Geomalla o Geogrilla: Malla utilizada en la construcción y mejora de pavimentos que aporta rigidez y flexibilidad a la estructura.

Hectómetro: Es una unidad de longitud, equivale a 100 metros. Hecto es el prefijo para 100 en el Sistema Internacional de Unidades.

Hidrocarburos aromáticos: Son aquellos hidrocarburos que poseen las propiedades especiales asociadas con el núcleo o anillo del benceno, en el cual hay seis grupos de carbono-hidrógeno unidos a cada uno de los vértices de un hexágono.

Índice de Fraass: Es la medida de las propiedades de quiebre del asfalto a bajas temperaturas, evaluadas mediante el ensayo Fraass, indicación del riesgo de craqueo del asfalto a bajas temperaturas.

Inerte: Identifica a todo lo que carece de movilidad o vida.

Isótropo: Material cuyas propiedades mecánicas y térmicas son las mismas en todas las direcciones.

Kevlar: Es un material sintético (plástico súper fuerte).

Licua: Hacer líquida una cosa sólida, triturar o derretir un material.

Médium Curing: Curado medio, asfaltos rebajados de fraguado medio diluidos para una mayor fluidez.

Monografía: Documento o estudio escrito de un tema en particular.

Monotónica: Carga que va aumentando de cero hasta la rotura sin producirse descargas.

Mordaza Lottman: Cabezal de prueba, sirve para hacer pruebas sobre especímenes probetas.

Nylon: Fibra sintética, elástica y resistente, que se utiliza para fabricar hilos y tejidos.

Poliamidas: Es un tipo de polímero que contiene enlaces de tipo amida. Las poliamidas se pueden encontrar en la naturaleza, como la lana o la seda.

Polímero: Es un compuesto químico cuyas moléculas están formadas por cadenas en las que se repite una unidad básica, esta unidad que se repite se denomina monómero.

Poliolefina: Son materiales plásticos sintetizados a partir de hidrocarburos alifáticos de cadena corta (olefina) que se van uniendo uno tras otro hasta formar una cadena de gran longitud y elevado peso molecular.

Pumping: Bombeo, movimiento del agua (con material en suspensión) ubicada debajo de la losa o su eyección hacia la superficie como resultado de la presión generada por la acción de las cargas.

Quick Setting: Emulsiones de quiebre controlado.

Rapid Curing: Asfalto cortado de curado rápido.

Riego de liga: Aplicación delgada y uniforme de material asfáltico sobre una superficie existente de asfalto o de concreto hidráulico, con la finalidad de asegurar la adherencia entre capas.

Sistema Heterogéneo: Es un sistema termodinámico formado por dos o más fases.

Slow Curing: Asfaltos cortados de curado lento.

Slurry Seal: Lechadas asfálticas, sistema de revestimiento de pavimentos de aplicación en frío.

Stripping: Deterioro del pavimento, pérdida de recubrimiento.

Testigos: Probeta, briqueta, cilindro o núcleo, muestra.

Viga Benkelman: Instrumento que se utiliza para medir la deflexión de la superficie de una carretera, provocada por el paso de las ruedas de los vehículos.

Lista de Abreviaturas o Siglas

A_{ab}: Porcentaje de absorción.

AASHTO: Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transporte (American Association of State Highway and Transportation Oficiala).

AC: Asfaltos cortados.

ASU: Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Estatal de Arizona.

cm: Centímetros.

CA: Cemento asfáltico.

CE_{ef}: Capacidad estructural efectiva del pavimento.

CE_f: Capacidad estructural que necesita para soportar las solicitaciones previstas.

CE_{rec}: Capacidad estructural del recapado a colocar.

CMS: Quiebre medio.

Corp: Corporación.

CQS: Quiebre controlado.

CRS: Quiebre rápido.

CSS: Quiebre lento.

D: Diámetro de la probeta.

D₀: Deflexión absoluta del pavimento o deflexión FWD.

D_{vb}: Deflexión de pavimento medido con Viga Benkelman.

e: Módulo elástico o módulo resiliente, M_r .

ec: Ecuación.

EE: Ejes equivalentes.

EE_{1,5}: Ejes equivalentes necesarios para llevar a la estructura a un $P_f=1,5$.

EE_p: Ejes equivalentes acumulados a la fecha de análisis.

EM: Estabilidad Marshall.

e_{RI}: Módulo resiliente de elasticidad instantáneo.

e_{RT}: Módulo resiliente de elasticidad total.

E_s: Módulo del suelo de subrasante.

Gpa: Giga-pascales.

gr: Gramos.

H: Espesor o altura de probeta.

MAC: Mezcla asfáltica en caliente.

IRI: Índice de rugosidad internacional.

IRS: Índice de resistencia conservada.

ITS: Resistencia a la tracción Indirecta.

J: Joule (julios).

Jc: Tasa de liberación de energía de deformación crítica (kJ / m²).

Kg: Kilogramo.

Kj: Kilo Joule.

Kpa: Kilo Pascales.

L: Altura promedio de la probeta, en cm.

m: Metros.

m²: Metros cuadrados.

m³: Metros cúbicos.

MC: Asfalto cortado de curado medio (*médium curing*).

M.C.: Manual de carreteras.

MEPDG: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (Guía Mecánica-Empírica de Diseño de Pavimentos).

MJ: Mega Joule.

mm: Milímetros.

mm Hg: Milímetros de mercurio.

Mpa: Mega Pascales.

M_r: Módulo resiliente.

N: Newton.

N.P.: No aplica.

N°: Número.

NE: Número estructural.

NE_{ef}: Número estructural efectivo del pavimento existente.

NE_f: Número estructural necesario para soportar el tránsito futuro.

NE_o: Número estructural original de la estructura.

NE_{rec}: Número estructural del recarpeteo.

P: Carga máxima aplicada.

P_f: Índice de serviciabilidad.

Pulg: Pulgadas.

P_{últ}: Carga aplicada que lleva la probeta a la falla.

R: Deflexión representativa.

RC: Asfalto cortado de curado rápido (*rapid curing*).

S.A.: Sociedad Anónima.

SBS: Polímero (estireno-butadieno-estireno).

SC: Asfaltos cortados de curado lento (*slow curing*).

SCB: Prueba de flexión semicircular (SCB) a temperatura intermedia.

S_T: Resistencia a la tracción.

T: Tránsito (EE en millones).

t: Espesor de la probeta.

TAI: The Asphalt Institute (Instituto de Asfalto).

T_{máx}: Tamaño máximo.

TSR: Resistencia a la tracción retenida.

UNE-EN: Norma europea internacional.

v: Coeficiente de Poisson.

VAM o VMA: Vacíos en el agregado mineral.

Vol: Volumen.

VR: Vida útil remanente.

ν_{RI} : Coeficiente de Poisson instantáneo.

ν_{RT} : Coeficiente de Poisson total.

Z: Amplitud de la deformación horizontal.

ΔH_I : Deformación horizontal instantánea recuperable.

ΔH_T : Deformación horizontal total recuperable.

ΔV_I : Deformación vertical instantánea recuperable.

ΔV_T : Deformación vertical total recuperable.

": Pulgadas.

%: Porcentaje.

°C: Grados Celsius.

°F: Grados Fahrenheit.

Capítulo 1: Introducción

1.1. Introducción General

En Chile, a partir del año 1990, ha aumentado a gran escala el uso de materiales bituminosos en obras de construcción de pavimentos, superando el consumo de este material (visco-elástico), las 300.000 toneladas al año entre cemento asfáltico y emulsiones asfálticas [1]. Esto se atribuye a su menor costo inicial y rápida construcción (comparado con un pavimento de hormigón). La decisión de emplear cada vez mayores cantidades de asfaltos, se debe a la necesidad de construir nuevas vías de tránsito producto del gran crecimiento del mercado automotriz y de la evolución como país, lo que obliga a acelerar la construcción de infraestructura vial [5].

Las entidades administrativas encargadas de los caminos públicos y rurales, tales como el Ministerio de Obras Públicas, deben realizar mantenciones a la carpeta de rodado, ello con el objetivo de conservar por un periodo mayor de tiempo las condiciones de seguridad, comodidad y nivel de servicio; además las vías de tránsito deben estar operativas el mayor tiempo posible, por lo tanto la mantención y rehabilitación debe realizarse en el menor tiempo, teniendo un costo monetario y social asociado.

Una de las técnicas más utilizadas, son los recapados asfálticos de la carpeta de rodado, que es la preferida por el organismo regulador principalmente por el tiempo y costo de rehabilitación del camino.

Uno de los problemas de esta técnica (recapado) es la durabilidad de la nueva carpeta aplicada, por ello cada día se investigan, crean y aplican nuevos materiales y procedimientos para mejorar las propiedades mecánicas de los recapados.

Es así como la empresa norteamericana FORTA CORPORATION en su búsqueda de nuevos materiales que prolonguen la vida útil de los caminos, creó una fibra sintética a base de *Kevlar*, que se basó en el mismo concepto que utilizaron los egipcios hace miles de años en la construcción de sus grandes obras, quienes aplicaban paja y pelos de animales a sus mezclas utilizadas para mejorar la resistencia. La empresa llamó a este conjunto de fibras FORTA-FI y la aplica a las mezclas asfálticas para mejorar su propiedad mecánica.

Por lo anterior se hace necesario evaluar la aplicabilidad de esta fibra al mercado nacional con el fin de verificar si es una aportación que sirva para retrasar la aparición de fallas en los recapados, específicamente fisuras por reflexión de grietas.

1.2 Planteamiento del Problema

Debido al constante crecimiento y desarrollo en Chile, surge la necesidad de comunicación vial entre comunas, ciudades y regiones, generando la obligación de contar con carreteras y vías con capacidad para un flujo de tráfico vehicular óptimo. La elaboración, mantención y rehabilitación de los caminos son necesarias para asegurar estándares satisfactorios de calidad en las vías, que provean conectividad y seguridad a los usuarios. Esto implica investigar e incorporar nuevos métodos de diseño y mantención de pavimentos que se ajusten a las exigencias tanto económicas, sociales y medio ambientales que se requieren en la actualidad, utilizando materiales disponibles y ayudando a mantener un crecimiento sustentable.

Cada año mueren y resultan heridas millones de personas como consecuencia de los accidentes en las vías de tránsito. Estas son la principal causa de muerte de la población joven entre los 15 y los 29 años de edad [2]. Además de los daños físicos en las personas, el mal estado de los caminos provoca daños en los vehículos, lo que se traduce en un costo para el usuario y la economía en general [3].

Los daños en los pavimentos flexibles, como se observa en la Figura 1.1 se deben a las acciones que son ejercidas directa o indirectamente sobre ellos, los principales factores son:

- Repetición y sobrecarga de tráfico vehicular.
- Los agentes del clima (temperatura, humedad, etc.).

Las fallas se inician o se producen en los puntos deficientes o debilitados de algunas partes fundamentales de la vía, los cuales no pueden soportar eficientemente los efectos destructivos de alguno de los factores señalados anteriormente [4].

Entre los deterioros más frecuentes producidos en las capas asfálticas de las carreteras se encuentran las deformaciones plásticas y los daños producidos por la fisuración de las estructuras. Uno de los tipos es la fisuración por reflexión de grietas, el que se caracteriza por la aparición de grietas desde las capas inferiores hacia las superiores como, por ejemplo, juntas y grietas de hormigón. Estas fisuras progresan a medida que trabajan o se mueven las juntas o fisuras del pavimento de hormigón o capas asfálticas ubicadas en la capa inferior, reflejándose así la fisura en la superficie. Estas fallas producen una paulatina pérdida de las propiedades estructurales, provocando dificultades en el tráfico vehicular [5].



Figura 1.1 - Fisuración en Pavimentos Flexibles. Fuente [6].

Las vías de tránsito deben ser mantenidas en buen estado y una de las técnicas más utilizadas en la rehabilitación de pavimentos, tanto de hormigón como de asfalto, es la instalación de una nueva carpeta asfáltica sobre un pavimento ya existente con el fin de renovar la superficie de rodado, como se muestra en la Figura 1.2. Uno de los principales desafíos de esta técnica de rehabilitación, es evitar (o retardar lo más posible) la reflexión de las grietas desde el pavimento existente hacia la nueva carpeta bituminosa [7].

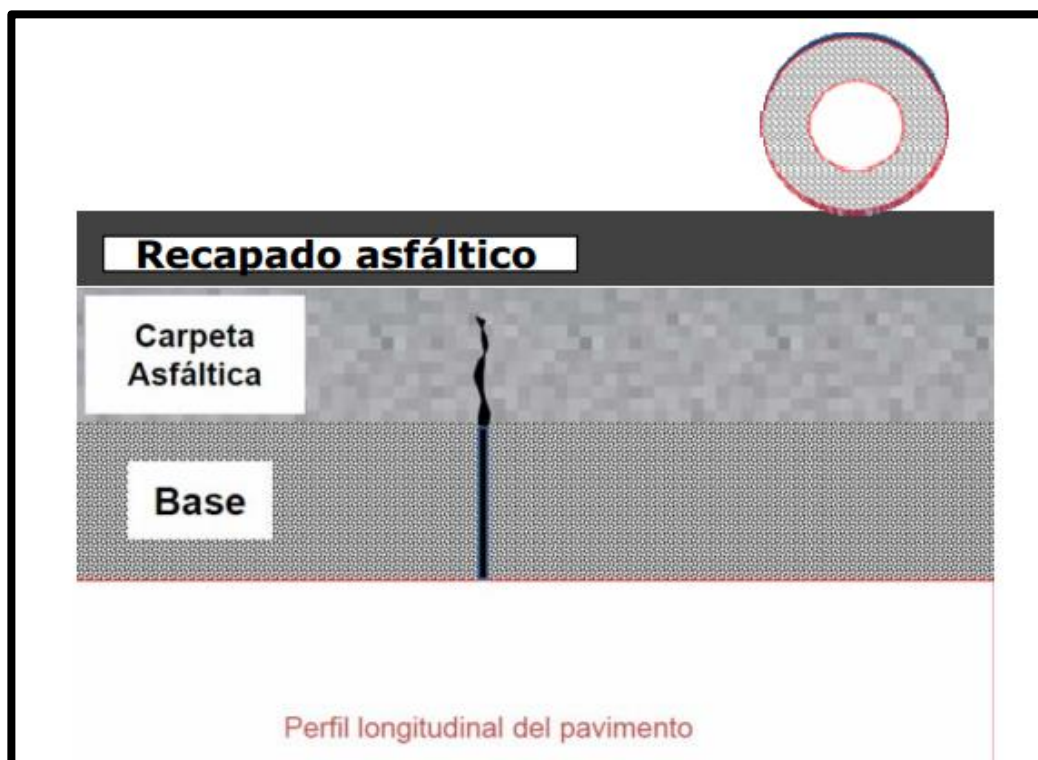


Figura 1.2- Fisura bajo un Recapado Asfáltico. Fuente [8].

El desafío de la ingeniería vial es encontrar nuevos materiales, diseños y métodos constructivos que nos ayuden a prolongar la vida útil de los recapados asfálticos, facilitando su aplicación y mantención.

El tipo y espesor del material bituminoso que se debe utilizar en las mezclas asfálticas para recapado influye determinantemente en la durabilidad de estos. La gran mayoría de los recapados asfálticos se realizan con mezclas asfálticas convencionales que, en ocasiones, no cumplen con las condiciones para resistir los altos niveles de esfuerzos y deformaciones solicitadoras, por lo que a menudo presentan fallas prematuras y bajas durabilidad [7].

El presente proyecto tiene por objetivo principal el estudio de una nueva fibra FORTA-FI para retardar la aparición de grietas por reflexión en recapados asfálticos, aumentando la vida útil de la carpeta de rodado. Este material es una fibra sintética a base de Aramida, conocida comúnmente como *Kevlar*, y poliolefina, dicha combinación de fibras sintéticas pretende mejorar las propiedades mecánicas de las carpetas de rodado retardando la aparición de grietas por reflexión [9].

La empresa FORTA, junto al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Estatal de Arizona (ASU), han participado en varios estudios de Investigaciones bajo la norma AASHTO y la MEPDG, evaluando el comportamiento de los áridos y mezclas asfálticas norteamericanas [10]. Estudios de investigación que permitieron el desarrollo de la fibra FORTA-FI extremadamente fuerte y químicamente inerte que se mezcla de forma rápida y es distribuida de manera uniforme en las mezclas asfáltica. Una vez adicionada a cualquier tipo de mezcla, las fibras de FORTA-FI actúan como refuerzo tridimensional isótropo (iguales propiedades y refuerzo en todas las direcciones) a lo largo de la capa asfáltica, evitando considerablemente los problemas que se producen en los recapados de pavimentos de concreto asfáltico [9], como se muestra en la Figura 1.3 a continuación.

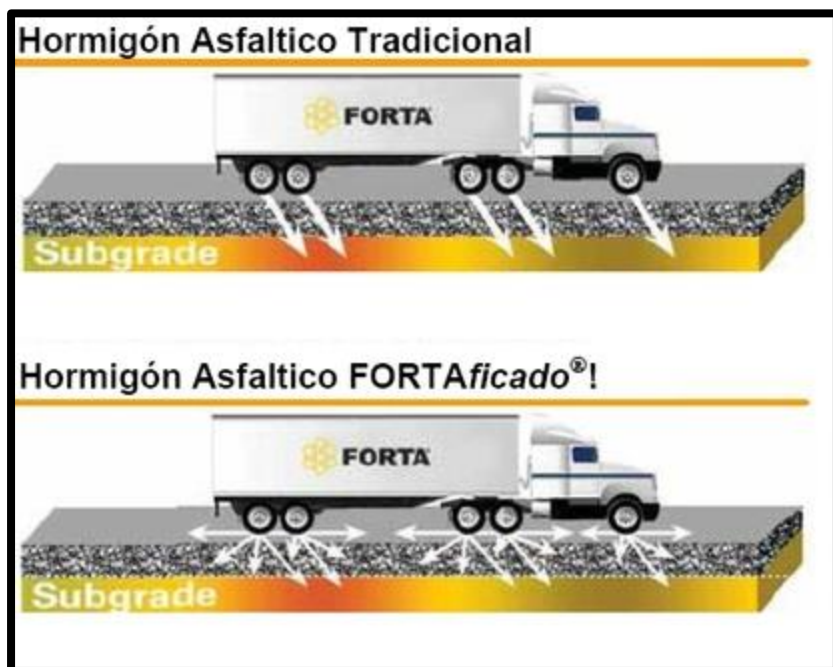


Figura 1.3 - Distribución de esfuerzos en Mezclas Asfálticas sin y con fibra FORTA-FI. Fuente [9].

El objetivo de este trabajo de título es evaluar la aplicabilidad y comportamiento de la fibra FORTA-FI en el mercado nacional, con áridos del río Aconcagua y mezclas asfálticas tradicionales de la Región de Valparaíso, con el propósito de retardar la aparición de las fisuras por reflexión en los recapados asfálticos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Estudiar el efecto de la fibra FORTA-FI para postergar la aparición de fisuras por reflexión en mezclas asfálticas en caliente para recapados.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar el comportamiento mecánico en laboratorio de concreto asfáltico con fibra sintética FORTA-FI, áridos del río Aconcagua y mezclas asfálticas tradicionales.
- Analizar en laboratorio el comportamiento mecánico de pavimentos flexibles con y sin fibras FORTA-FI, áridos del río Aconcagua y mezclas asfálticas tradicionales, utilizando el Manual de Carreteras y el método de diseño AASHTO, según corresponda.
- Comparar en la Unidad de Gestión de Calidad y Laboratorio de la Región de Valparaíso del M.O.P. el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente con y sin la utilización de fibras sintéticas FORTA-FI, con áridos del río Aconcagua y mezclas asfálticas tradicionales.
- Evaluar si es posible con fibras sintéticas FORTA-FI, áridos del río Aconcagua y mezclas asfálticas tradicionales, disminuir el espesor de la capa asfáltica sin detrimento de la resistencia y vida útil.

1.3.3 Resultados Esperados

- Se espera que las fibras sintéticas FORTA-FI sean de gran aporte en la postergación y disminución de la fisuración y reflexión de grietas en los recapados asfálticos.
- Si posterior a los análisis se obtiene resultados negativos, no se recomendará el uso de FORTA-FI en recapados asfálticos para la postergación de la fisura por reflexión, con los elementos ya señalados.

1.4 Alcances del Trabajo de Título

- El asfalto, los áridos y el *filler* usados será provisto por la Constructora Bitumix S.A., planta Concón.
- El asfalto será del tipo CA-24, para mezcla convencional y mezcla modificada que se utiliza en pavimentos en la Quinta Región, zona con clima templado, de procedencia empresa Probisa, además se le adiciona a la mezcla *filler* de aportación.
- Los áridos del Río Aconcagua, utilizados para confección de mezcla tradicional, se dividen en cuatro categorías; gravilla 3/4", gravilla 1/2", polvo de roca y *filler*.
- La fibra FORTA-FI, será proporcionada por Roberto Orellana López, Gerente General de LUCO3 INGENIERIA VIAL.
- Los ensayos serán realizados en la Unidad de Gestión de Calidad y Laboratorio de la Región de Valparaíso, perteneciente al Ministerio de Obras Públicas.
- En caso de ser necesario, se gestionará la opción de realizar ensayos en otro laboratorio (Laboratorio Nacional de Vialidad).
- Además de la incorporación de la fibra a la mezcla, no se modificara en ningún otro parámetro el diseño empleado por Bitumix S.A..
- En la Unidad de Gestión de Calidad y Laboratorio de la Región de Valparaíso del M.O.P., se elaborará la mezcla y aplicará la fibra, simulando las condiciones de trabajo en obra.
- La factibilidad económica, utilizando la fibra FORTA-FI, no es objetivo de este trabajo de título.

1.5 Estructura del Trabajo de Título

En el primer capítulo se explican y desarrollan los motivos y razones del trabajo de título, se señala la información obtenida, así como los objetivos y alcances en los que se basará el trabajo.

El segundo capítulo comprende el marco teórico del trabajo de título, presentando una recopilación de antecedentes bibliográficos de manera extensa y detallada.

En el tercer capítulo, se describe la metodología adoptada, describiendo las propiedades a estudiar y los pasos para obtener resultados.

En el cuarto capítulo, se mostrarán los resultados de los ensayos en laboratorio, con los cuales se establecerán las conclusiones, recomendaciones y observaciones.

En el quinto y último capítulos presentan las conclusiones, en base a los resultados de los ensayos en laboratorio y la ejecución de un tramo de prueba en caso de construirse; este punto, aunque no es obligatorio para el presente proyecto de Título, podría ser una aportación como estudiante a la Ingeniería Vial, siempre que sea posible construir una cancha de pruebas en el periodo de estudio de la presente Memoria de Título.

Capítulo 2: Marco Teórico

En el presente trabajo de título se plantea verificar la aplicabilidad al mercado nacional, de una nueva fibra a base de *Kevlar*, de nombre FORTA-FI, para mejorar la durabilidad de los recapados frente a la floración de fisuras, por lo que es preciso reunir y seleccionar antecedentes acerca de su origen, composición y propiedades, además es fundamental evaluar el comportamiento en laboratorio de esta nueva fibra en mezclas tradicionales de la Quinta Región por lo que se debe someter a distintos tipos de análisis, según lo establecido principalmente en la normativa nacional y con los recursos del laboratorio regional, de modo de evaluar el aporte a las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente.

2.1 Pavimentos

2.1.1 Definición de Pavimentos

Un pavimento es un sistema de capas superpuestas, horizontales y verticales (espesor de capas), que se diseñan y construyen con materiales previamente analizados. Estas estructuras se colocan sobre la subrasante la cual está técnicamente preparada. Este grupo de capas está preparado para resistir los esfuerzos transmitidos debido a las cargas repetidas del tránsito y las condiciones del medio ambiente. [11].

Un pavimento para desempeñar adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito para el periodo que fue diseñado.
- Ser resistente a los agentes del medio ambiente (temperatura, humedad, etc.).
- Presentar una estructura superficial que permita que los vehículos se adapten a las velocidades de diseño definidas para el tráfico vehicular, ya la carpeta de rodado tiene una crucial influencia en la seguridad vial.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan una cómoda circulación de los vehículos.
- Debe ser durable, es decir, el pavimento debe mantenerse en buen estado el mayor tiempo posible o al menos se espera que sea transitable de manera óptima por todo el periodo para el cuál fue diseñado.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- Debe poseer el color apropiado para evitar reflejos y deslumbramientos. [11]

2.1.2 Componentes de un Pavimento

En la Figura 2.1 se muestran los componentes principales de un pavimento asfáltico (flexible). Se sabe que la estructura de un pavimento está formada por un conjunto de capas que forman una superestructura (sistema multicapa) que es construida encima de una fundación subrasante, esta última debe ser el resultado de un estudio geotécnico adecuado y estar formada por las capas de sub-base y suelo compactado. El sistema multicapa debe transmitir las cargas del tránsito hasta el terreno natural sin que éste se deforme [12]. Se debe señalar que la cantidad de capas y espesor a utilizar son definidas de acuerdo al proyecto que se esté desarrollando y que generalmente la calidad estructural de las capas decrece con la profundidad [11].

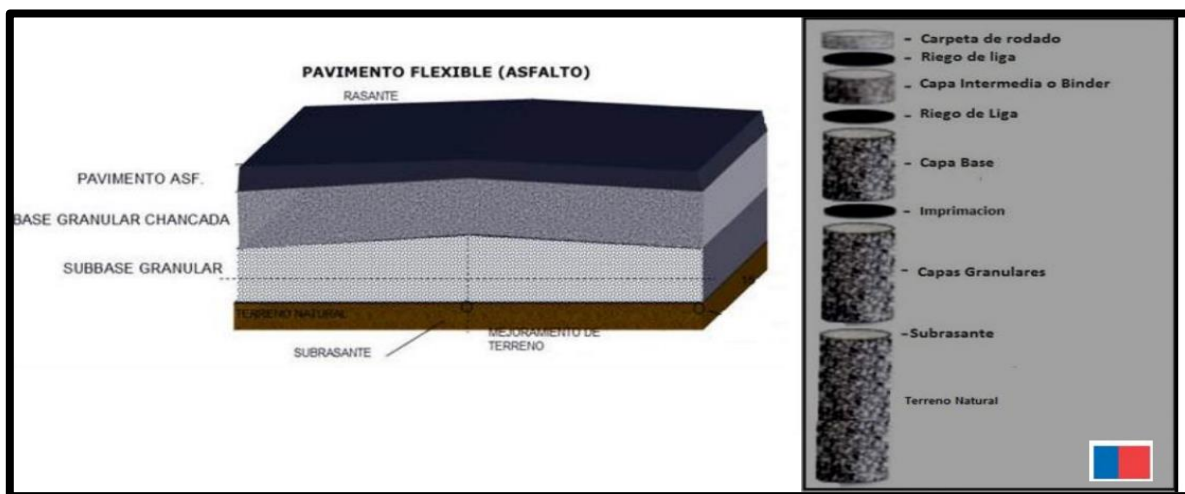


Figura 41 - Distribución de las capas estructurales de un Pavimento Flexible. Fuente [13].

Como se puede apreciar, un pavimento flexible está compuesto por varias capas que pueden ser asfálticas y granulares. Su calidad estructural varía según espesor y materialidad, Dependiendo del tipo de tránsito (solicitud), condiciones ambientales, tipo de suelo u algún otro criterio de diseño, no siempre serán necesarias todas las capas mostradas en la figura, ello dependerá del tipo proyecto y diseño que se requiera [1].

2.2 Tipos de Pavimentos

Los pavimentos se clasifican según los materiales de que están constituidos y de cómo estos se estructuran. Los pavimentos se dividen en pavimentos flexibles, semirrígidos, rígidos y articulados; los más usados en Chile son los rígidos y flexibles, siendo este último tipo el que concentra un especial interés de estudio [11].

2.2.1 Pavimentos Flexibles

Los pavimentos flexibles están formados por una o varias carpetas bituminosas (sistema multicapa), y se denominan flexibles ya que la estructura se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas a las cuales es sometido, se apoya generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la sub-base [12].

2.2.2 Pavimentos Semi-rígidos

Un pavimento Semi-rígido o compuesto es aquel en el que se combinan distintos tipos de pavimentos, generalmente, flexibles y rígidos. Regularmente la carpeta flexible es colocada en la superficie como carpeta de rodado y la capa de pavimento rígido está por debajo. Es usual que un pavimento compuesto tenga de capa base una superficie rígida, con la finalidad de corregir o modificar las propiedades mecánicas del suelo existente [11].

2.2.3 Pavimentos Rígidos

Son aquellos que están constituidos por una superficie de rodado rígida, normalmente una losa de concreto que puede ser simple o reforzado, instalada sobre una subrasante o sub-base acondicionada técnicamente para soportar la losa. Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico, así como de su elevado coeficiente de elasticidad, absorbe gran parte de los esfuerzos ejercidos sobre el pavimento traspasando bajas tensiones a la sub-base. La capacidad estructural de un pavimento rígido se lo proporciona la resistencia de las losas, por lo que las demás capas que conforman el pavimento ejercen poca influencia en el diseño y espesor del camino [11].

2.2.4 Pavimentos Articulados

Los pavimentos articulados están compuestos por una capa de rodadura que está elaborada con bloques de concreto prefabricados o bloques pétreos, llamados adoquines, de espesor uniforme y semejante entre sí. Generalmente se colocan sobre una capa delgada de arena la cual, a su vez, se apoya sobre una capa de base granular o directamente sobre la subrasante [11].

2.2.5 Partes de un Pavimento Flexible

Para el caso en estudio toma especial importancia los pavimentos flexibles. En la Figura 2.2 se muestra un diseño y distribución de esfuerzos típica de un pavimento flexible.

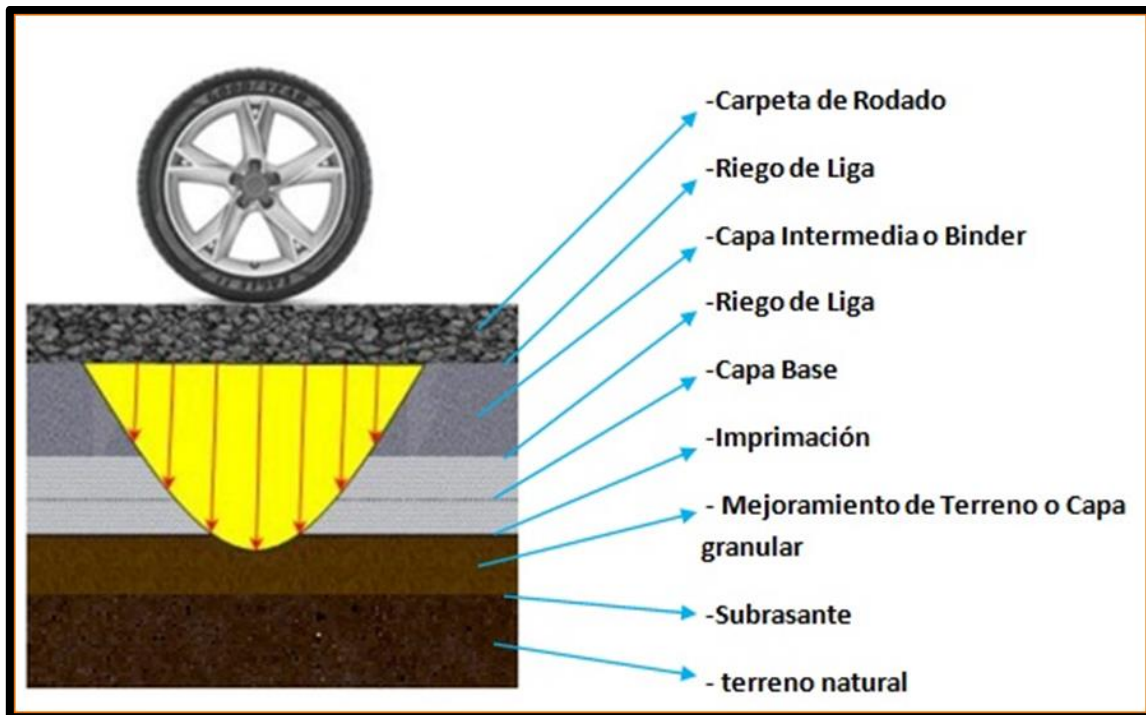


Figura 52 - Estructura y distribución de esfuerzos en Pavimento Asfáltico. Fuente [1].

2.3 Tipos de Fallas en Pavimentos Flexibles (Mezclas Asfálticas)

Variadas son las fallas que puede presentar un pavimento flexible; los factores más comunes que influyen en el deterioro de la carpeta de rodado son: mal diseño de la estructura del pavimento, factores climáticos adversos y las sobrecargas debido al tránsito vehicular. El presente trabajo de Título se enfoca en tratar de retardar la falla por reflexión de grietas en la rehabilitación de caminos, utilizando una innovación en fibras sintéticas desarrollada por la empresa FORTA CORPORATION.

Los tipos de fallas presentes en una estructura de pavimento flexible son:

- Fisuras y grietas.
- Deterioro superficial.
- Otros deterioros.

A continuación, se presenta la definición de algunos deterioros más relevantes y sus posibles causas [14].

2.3.1 Fisuras y Grietas

2.3.1.1 Fisuras y Grietas por Fatigamiento

Son una cadena de grietas interconectadas con modelos o patrones irregulares, comúnmente se localizan en zonas donde hay repeticiones de carga o una mayor sollicitación del tránsito. La fisuración tiende a iniciarse donde los esfuerzos de tracción son mayores, generalmente en el fondo de las capas asfálticas, su aspecto a simple vista tiene un parecido con la piel de cocodrilo, nombre de denominación común. Las principales causas de las fallas por fatiga (grietas piel de cocodrilo, como se observa en la Figura 2.3 son [14]:

- Espesor de estructura insuficiente (mal diseño).
- Deformaciones de la subrasante (deficiente construcción de las capas inferiores).
- Endurecimiento de la mezcla asfáltica (por oxidación, envejecimiento o factores climáticos).
- Problemas de drenaje que afectan las capas granulares.
- Proceso de compactación deficiente de las capas granulares o asfálticas.
- Deficiencias en la elaboración de la mezcla asfáltica.
- Recapados mal ejecutados, bases granulares defectuosas, juntas mal elaboradas e implementación de reparaciones que no corrigen el daño [14].



Figura 63- Falla tipo Piel de Cocodrilo. Fuente [14].

2.3.1.2 Fisuras y Grietas en Bloque

Este tipo de grietas consiste en que la carpeta de rodado es dividida en bloques de forma más o menos rectangular. Estos bloques se presentan usualmente en áreas no cargadas a diferencia de las grietas por fatiga. Sin embargo, debido al tránsito se pueden transformar en fisura por fatigamiento, este tipo de grietas señala que el asfalto se ha endurecido, lo cual se produce debido al envejecimiento de la mezcla o al uso de un tipo de asfalto inapropiado para el clima de la zona. Las posibles causas son [14]:

- Variación brusca de la temperatura, lo que se traduce en ciclos de contracción y dilatación (esfuerzo – deformación) sobre la mezcla.
- Reflejo de grietas de contracción provenientes de la base.
- Cambio volumétrico del agregado fino de la mezcla asfáltica sumado con el uso de un asfalto de baja penetración.
- Espesor del pavimento inadecuado para el nivel de solicitaciones.
- Baja capacidad de soporte de la subrasante [14].

2.3.1.3 Grietas de Borde

Son fallas con tendencia longitudinal a semicircular localizadas cerca del borde de la calzada, se generan por la ausencia de berma. La causa de este daño generalmente es una falta de confinamiento lateral del camino provocándose una disgregación de las capas, o por diferencia de nivel de la berma y la calzada. Las fisuras generalmente se encuentran a distancias entre 0,30 m a 0,60 m del borde de la calzada [14].

2.3.1.4 Fisuras y Grietas Longitudinales y Transversales

Son discontinuidades en la carpeta asfáltica, en dirección transversal o longitudinal al tránsito. Son el comienzo de esfuerzos de tensión en las capas de la estructura. De acuerdo a su ubicación en la carpeta de rodado se puede saber su causa, como por ejemplo: aquellas que se localizan en zonas sujetas a cargas pueden estar relacionadas con problemas de fatiga de toda la estructura o de alguna de sus partes [14].

Algunas de las posibles causas son:

- Endurecimiento de la mezcla asfáltica.
- Reflexión de grietas.
- Fatiga de la estructura provocada por huellas de tránsito.
- Diferencia de rigidez de los materiales de la subrasante, en zonas de contacto entre corte y terraplén.
- Riego de liga insuficiente o ausencia total.
- Fallas de diseño, espesor insuficiente [14].

2.3.1.5 Fisuras y Grietas Reflejadas (Fisuras por Reflexión)

Dado que el objetivo de este trabajo de título es evaluar la opción de retardar la aparición de este tipo de fisura aplicando la fibra sintética FORTA-FI se analizará con mayor detalle la causa de este tipo de fisura.

Se conoce como fenómeno de reflexión a la propagación de fisuras desde el fondo de una capa estructural hasta su superficie, y se originan por movimientos horizontales y/o verticales entre los bloques rígidos de la capa de soporte. Estos movimientos generan concentración de esfuerzos de tensión y/o corte en la capa ubicada sobre las juntas y/o fisuras de la capa rígida en movimiento. Este es uno de los principales problemas que se da en los recapados asfálticos, reduciendo notablemente la vida útil de la nueva carpeta de rodado instala [20].

El movimiento horizontal se produce por efectos ambientales, específicamente por los cambios de temperatura que sufre el pavimento, ya que genera contracciones en la estructura e incrementan la abertura de las fisuras de la capa existente, originando concentración de esfuerzo de tensión en la capa de rodado. El desarrollo de las fisuras por reflexión en el pavimento depende de la magnitud y la velocidad de cambio de la temperatura, de la geometría del pavimento fisurado, de la distancia entre las juntas o fisuras, y de las propiedades del material de la sobre-carpeta [15].

Por otro lado, el movimiento vertical se produce por efecto del flujo vehicular, que produce movimientos verticales diferenciales en las discontinuidades generadas por las cargas que son traspasadas de capa en capa, originando concentración de esfuerzo de corte en la sobre-carpeta asfáltica, lo que se puede observar en las Figuras 2.4 y 2.5. Con este tipo de movimiento, la estructura del pavimento se ve afectada por factores como la magnitud de la carga, la transferencia de carga entre losas o bloques rígidos, y el apoyo de la subrasante [15], tal como se muestra en la Figura 2.6.

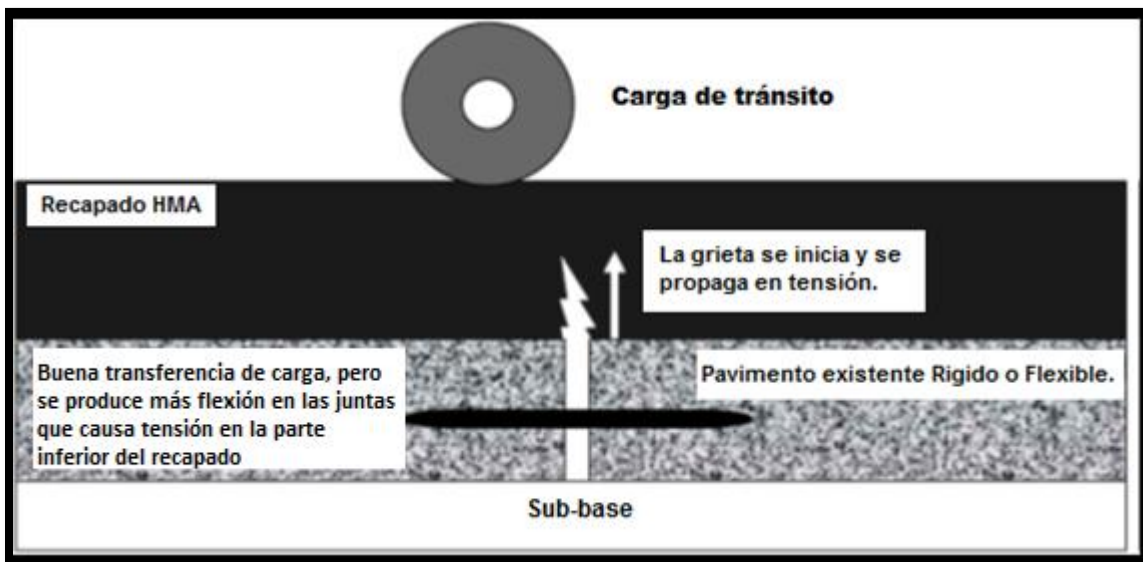


Figura 74- Fisuración inducida por tráfico, movimientos verticales. Fuente [15].

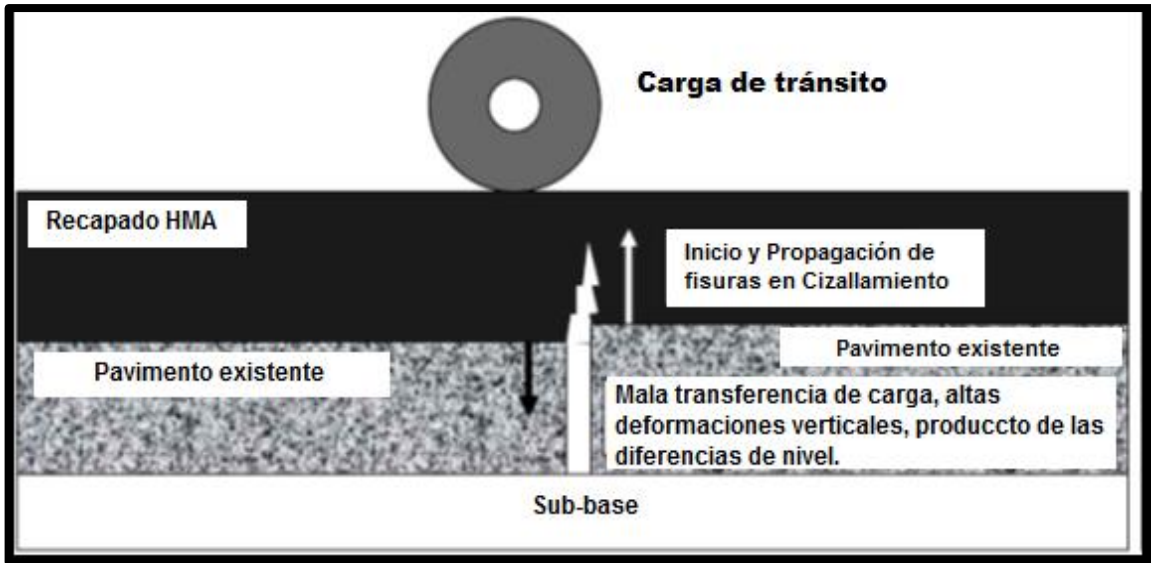


Figura 85 - Fisuración inducida por tráfico, movimientos verticales. Fuente [15]

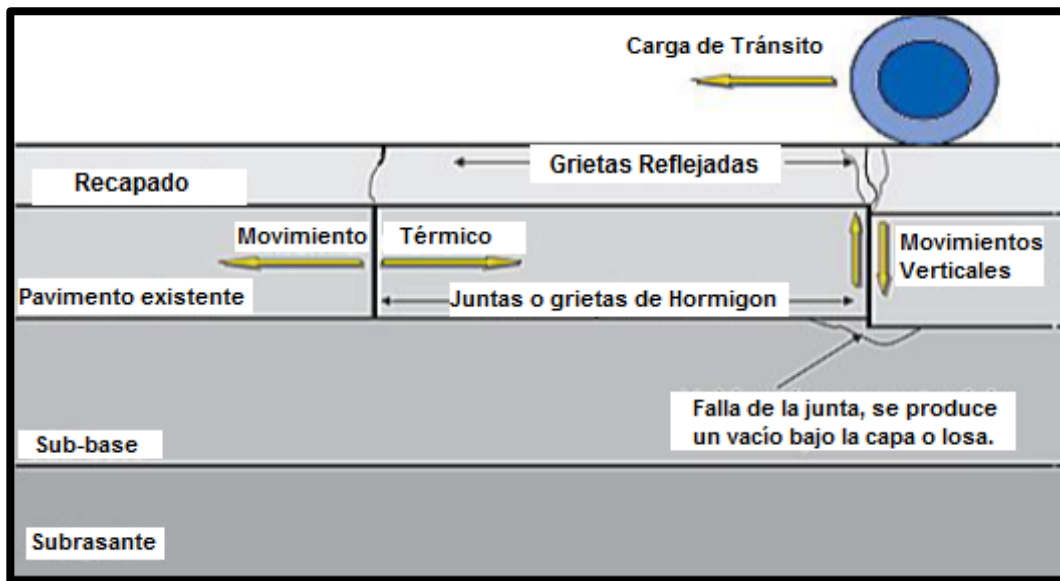


Figura 96 - Tipos de fatiga por reflexión. Fuente [15]

En la Figura 2.7 se puede apreciar el ciclo típico de la reflexión de una grieta en un recapado asfáltico.

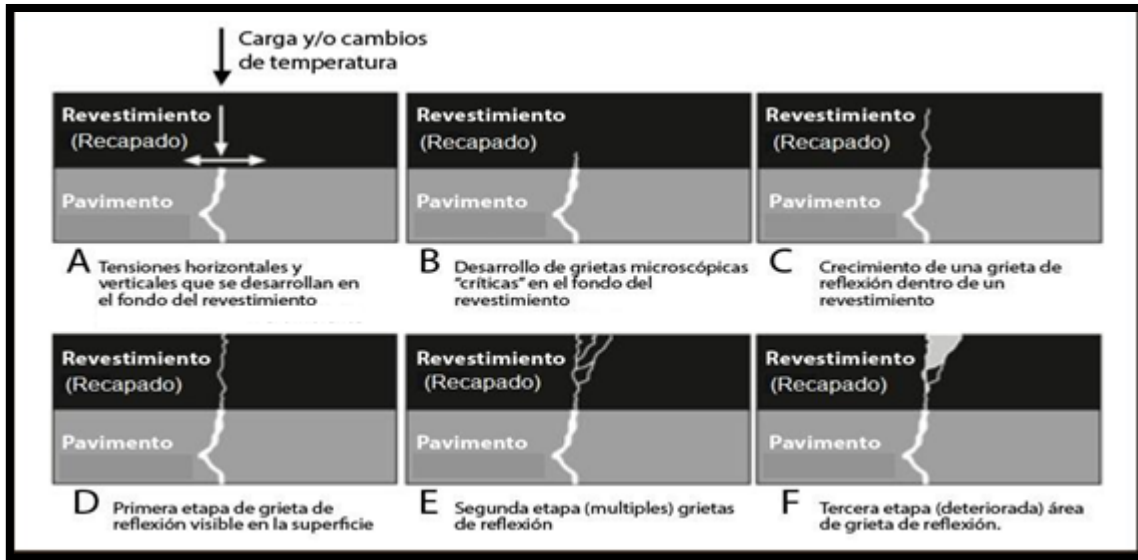


Figura 107- Ciclo típico de la reflexión de grietas. Fuente [16]

Según el catálogo de deterioro de pavimento incluido en el Manual de Carretera Volumen 7, las grietas reflejadas se pueden clasificar según su grado de severidad en:

- Bajas: "Fisuras sin sello con un ancho medio ≤ 3 mm o grietas selladas y en buen estado de un ancho indeterminable".
- Media: "3 mm < ancho grieta ≤ 20 mm o cualquier grieta de ancho medio ≤ 20 mm y rodeada por un agrietamiento de baja severidad".
- Alta: "Cualquier grieta > 20 mm o cualquier grieta de ancho medio ≤ 20 mm y rodeada por un agrietamiento de media o alta severidad" [17].

La forma indicada para medir las grietas reflejadas y en general grietas de cualquier tipo se muestra en la Figura 2.8, y cabe mencionar que una grieta menor a 3 mm es considerada como una fisura.

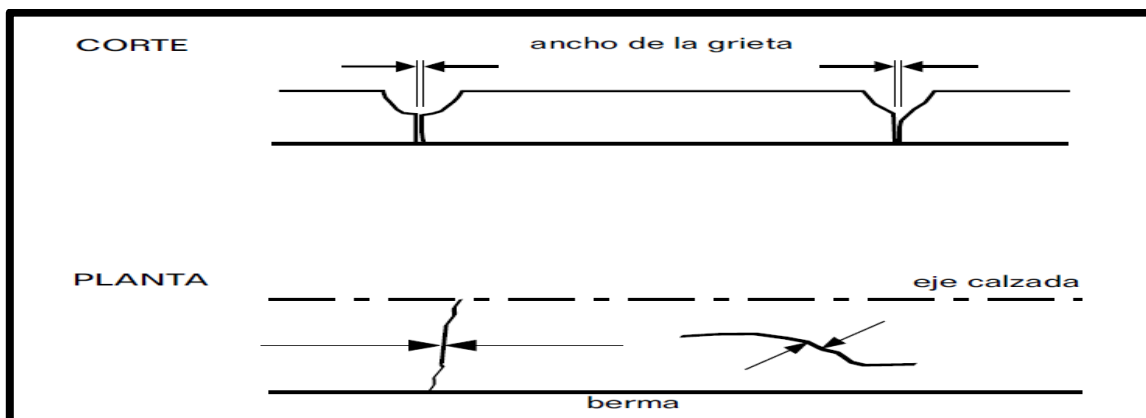


Figura 11 - Parámetro de medición de grietas. Fuente [17].

2.3.1.6 Ensayo para Medir la Resistencia a la Fisuración y Agrietamiento en Mezclas Asfálticas

El constante avance científico en el área de la Ingeniería Vial ha enfocado sus investigaciones con la finalidad de comprender el comportamiento de las mezclas asfálticas frente al fenómeno de fisuración, es así como se han desarrollado diferentes estudios algunos mediante modelos analíticos y otros mediante métodos experimentales que simulen el comportamiento de las mezclas asfálticas frente a los mecanismos de propagación de fisuras en las capas del pavimento, estos modelos analíticos y ensayos experimentales entregan información relevante que permite evaluar la resistencia de las mezclas ante distintos tipos de deterioro, uno de estos es la aparición de grietas reflejadas en recapados asfálticos [18].

En la literatura se han identificado cinco ensayos en laboratorio, tres de los cuales se observan en la Figura 2.9, cuya finalidad es medir propiedades de resistencia a la fractura y fisuración en mezclas asfálticas, estos son:

- a. Single-edge notched beam SE(B).
 - b. Semicircular bend SCB.
 - c. Disk-Shaped Compact tension DC(T).
 - d. Ensayo FENIX.
 - e. Overlay Tester OV.
- a) El ensayo de viga entallada, SE(B), consiste en una viga con una muesca en el centro, a la cual se aplica una carga hasta alcanzar la fractura, este ensayo se utiliza para determinar las propiedades de resistencia a la fractura de las mezclas asfálticas. La geometría del ensayo SE(B) proporciona una adecuada propagación de la fisura [18]. Sin embargo, su geometría rectangular tiene la desventaja, que limita su aplicabilidad sólo a vigas compactadas en laboratorio no permitiendo su aplicación a testigos para evaluar el comportamiento en obra.
- b) El ensayo de viga semicircular a flexión, SCB, consiste en un medio disco con una muesca cortada paralela al eje de carga y vertical a él, al cual se aplica una carga hasta alcanzar la fractura, determinando la tasa de liberación de energía de deformación crítica, este método de ensayo se utiliza para clasificar la resistencia de las mezclas de asfalto al agrietamiento [19], resalta la ventaja de su fácil aplicación tanto a muestras de probetas diseñadas en laboratorio, como también a testigos, sin embargo, por su geometría y forma de aplicación de la carga produce un complejo estado tensional que afecta el fenómeno de propagación de la fisura, generando un efecto de arco con altos esfuerzos de compresión en la localidad cercana a la fisura [18].
- c) El ensayo de tensión compacta en forma de disco DC(T) es un método práctico para obtener la energía de fractura del hormigón asfáltico, tiene las ventajas que presenta un tamaño mayor del área de fractura, además se puede aplicar tanto a núcleos compactados en laboratorio u en obra. Su desventaja se produce en el proceso de acerrado y preparación de las probetas, existe el inconveniente de generar microfisuras en los alrededores de los orificios donde se aplica la carga [18].
- d) El ensayo FENIX, consiste en someter media probeta cilíndrica con una fisura inducida a un esfuerzo de tracción con una velocidad de desplazamiento constante a una temperatura deseada, este permite obtener la energía disipada en el proceso de fisuración del material [18], este ensayo puede ser aplicado tanto a testigos como a probetas compactadas en laboratorio, su desventaja está en el adhesivo utilizado para unir el espécimen al instrumento de carga.

- e) El ensayo Overlay Tester, consiste en someter una probeta a un movimiento cíclico para simular el movimiento de apertura y cierre que es lo que causa la aparición de fisuras y grietas, por efecto de cargas y cambios de temperatura. El método determina la susceptibilidad de las mezclas asfálticas a fatigarse o agrietarse, se obtiene el potencial de resistencia al agrietamiento, frente a fenómenos como la aparición de grietas reflejadas. Este ensayo puede ser aplicado a núcleos diseñados en laboratorio o a testigos de obra, posee la desventaja de debilitar la muestra producto del moldaje de la probeta y la utilización de adhesivos para fijar el espécimen al equipo de prueba [20].

Además de los ensayo mencionados, existen en el mercado nacional otras pruebas como él; ensayo de Tracción Indirecta, ensayo de *Tensión directa, módulo resiliente diametral, tensión directa en forma de disco compacto, módulo de rigidez*, entre otros, que están enfocados en medir distintas propiedades como; la capacidad de resistencia, flexibilidad y desempeño de las mezclas asfálticas ante el agrietamiento, estos entregan información valiosa para estudiar y cuantificar el comportamiento de un recapado frente al fenómeno de agrietamiento por reflejo, en la figura siguiente se muestran diferentes geometrías de probetas de ensayos para medir energía de fractura y fisuración de recapados.

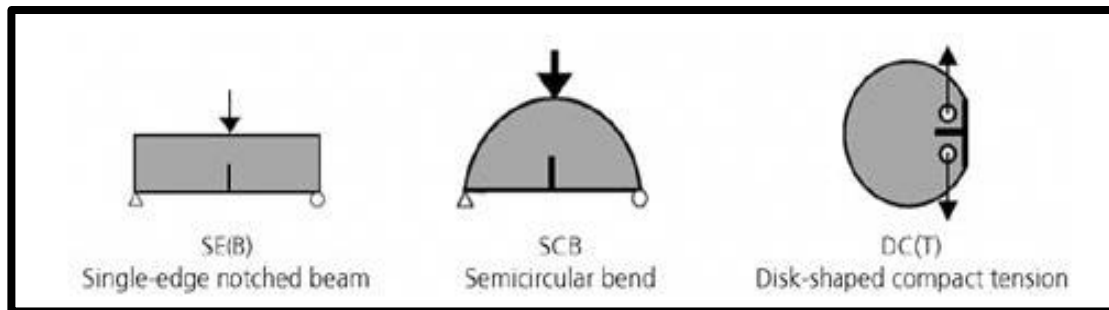


Figura 12.9- Diferentes geometrías de probetas. Fuente [18].

2.3.2 Deterioro Superficial

Estos tipos de fallas en mezclas asfálticas serán mencionados sólo para tenerlas en consideración, pero no son especificadas técnicamente ya que no son el objeto de estudio del presente trabajo de título.

Las principales fallas de deterioro superficial son:

- Parches deteriorados.
- Baches en carpetas asfálticas y tratamientos superficiales.
- Ahuellamiento.
- Deformación transversal.
- Exudaciones.
- Desgaste.
- Pérdida de áridos.
- Ondulaciones [14].

2.3.3 Otros Deterioros

Estos tipos de fallas de mezclas asfálticas serán mencionados sólo para tenerlas en consideración, pero no son especificadas técnicamente ya que no son objeto de estudio del presente trabajo de título, estas fallas son:

- Descenso de la berma.
- Separación entre berma y pavimento [14].

En el volumen 7 de Manual de Carreteras se encuentra el “Catálogo de Deterioro de Pavimentos”, el cual contiene un estudio de la Dirección de Vialidad con la mayoría de las grietas, falla y fisuras de los pavimentos nacionales.

2.4 Tipos de Asfaltos Usados en Chile

El asfalto es un material que se encuentra en la naturaleza es de color oscuro y tiene propiedades aglomerantes, una de las características por las que es empleado en ingeniería vial. Es un refinado del petróleo crudo, y está conformado por mezclas de hidrocarburos no volátiles de alto peso molecular, existe asfaltos naturales y refinados industriales, cuyo componente predominante es el bitumen [21].

Los asfaltos industriales son producidos por destilación por vapor o soplados. El método que produce un excelente asfalto para pavimentos es la destilación por vapor, en tanto el obtenido por aire o soplado no tiene mucha aplicación a las mezclas asfálticas [14].

Los asfaltos derivados del petróleo se obtienen del crudo por destilación. Es un método en el cual las distintas fracciones (productos) son separadas fuera del petróleo crudo por medio de un aumento de temperatura [22]. En la Figura 2.10 se muestra el diagrama de flujo del proceso de obtención del asfalto.

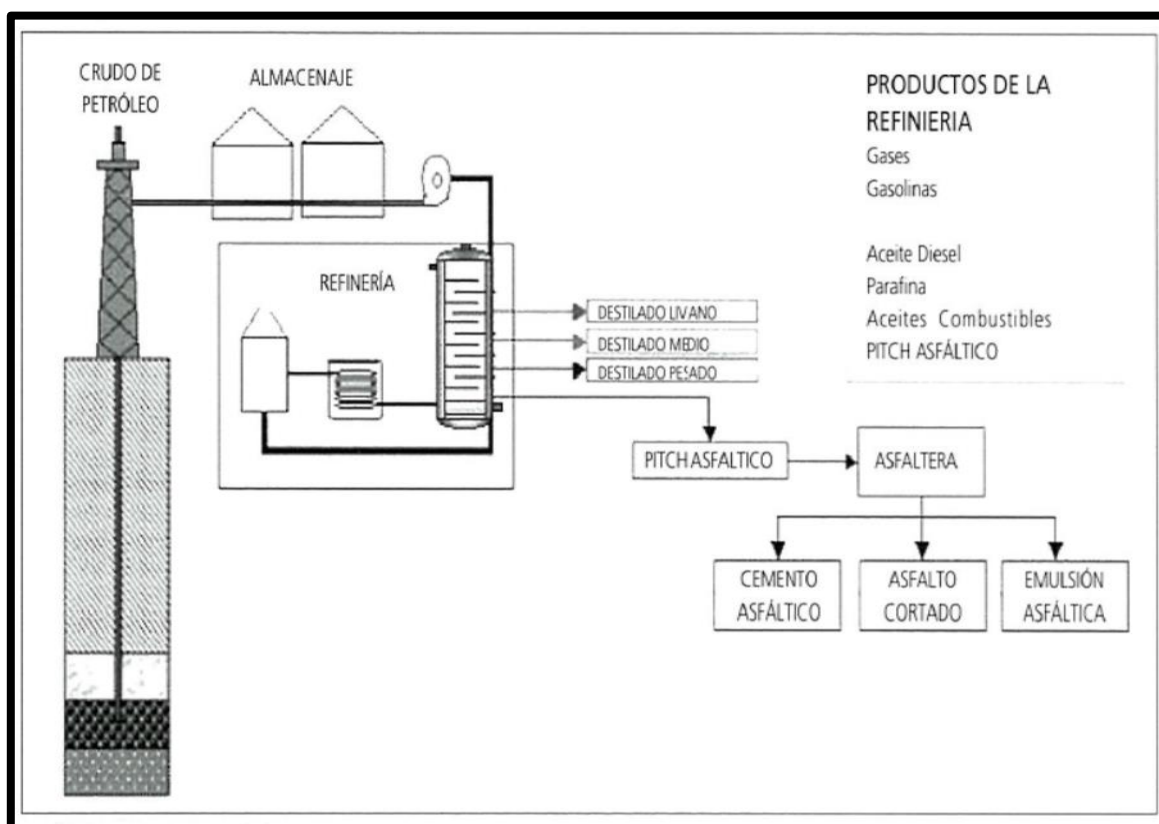


Figura 13- Proceso de refinación del Petróleo. Fuente [21].

El asfalto es un material altamente resistente, puede soportar la acción de la mayoría de los ácidos, sales y álcalis, es impermeable, adherente y cohesivo. Por otra parte, es un material termoplástico, es decir, su condición de estado es dependiente de la temperatura, así en ambientes fríos se comporta como un sólido elástico, a temperaturas intermedias (ambiente normal 0°C a 70°C) presenta una condición visco elástica y a medida que se eleva la temperatura pasa a ser un material de flujo plástico muy viscoso, para tornarse francamente líquido a temperaturas sobre los 110°C o 120°C [14].

Según la procedencia del petróleo crudo la formación de base se divide en:

- Base asfáltica.
- Base parafínica.
- Base intermedia [21].

Los asfaltos de base asfáltica se obtienen de petróleos asfálticos, poseen características ligantes apropiadas para ser utilizados en la pavimentación de caminos, además tienen buena resistencia al envejecimiento provocado por la acción del clima.

Los asfaltos de base parafínica tienen poca resistencia a factores climático y poseen bajas propiedades ligantes, por lo que no son apropiados para la pavimentación de caminos.

De acuerdo a su uso, los asfaltos se pueden clasificar en:

- Asfaltos para pavimentos.
- Asfaltos industriales.

Para el caso de estudio se considerará solo los asfaltos para pavimentos, los cuales se subdividen en:

- Cementos asfálticos.
- Asfaltos cortados.
- Emulsiones asfálticas [21].

2.4.1 Clasificación de los Asfaltos para Pavimentos

2.4.1.1 Cementos Asfálticos

Los Cementos Asfálticos, son un material ideal para la construcción de caminos de pavimento flexible, son preparados especialmente para implementarlos como carpeta de rodados, ya que cuentan con las siguientes propiedades:

- Es un material aglomerante, muy adhesivo, impermeable, resistente y duradero.
- Es consistente y puro.
- Es termoplástico, adquiere propiedades distintas de acuerdo a la temperatura a la cual está expuesto, por ejemplo: se licua a medida que se va calentando.
- Es resistente a los ácidos, sales y álcalis [14].

Se designan por las letras CA, son asfaltos refinados o una combinación de refinado y aceite fluidificante, existen varias formas de clasificar los cementos asfálticos, en Chile actualmente se clasifica según su grado de viscosidad.

En la mezcla se utilizará un CA-24, con una viscosidad absoluta a una temperatura de 60°C y 300 mm Hg que debe ser mayor o igual a 2400 poises; los CA-24 se utilizan en climas cálidos y/o templados como es caso de la Quinta Región. Además, existen los CA-14 para zonas frías con un rango de viscosidad de 1400 a 2400 poises a 60°C.

2.4.1.2 Asfaltos Cortados

Los asfaltos cortados AC, son un asfalto líquido o *cut-backs*, se compone de CA y un solvente volátil que puede ser bencina o kerosene, esto da resultado un producto más fluido que puede ser utilizado a temperaturas más bajas que un cemento asfáltico original. Son un líquido de color negro, de viscosidad variable [14].

Se clasifican según su velocidad de curado la cual se divide en 3 categorías:

- RC: Asfalto cortado de curado rápido (*rapid curing*), es una mezcla de CA con un solvente ligero como la Bencina, algunos tipos de asfaltos cortados son: el RC-70, RC-250 y RC-800, el número que acompaña la sigla (RC) indica la viscosidad en centistokes.
- MC: Asfalto cortado de curado medio (*medium curing*), cuyo solvente es la parafina o kerosene, una de sus características es que se puede trabajar a temperatura relativamente baja [14].
- SC: Asfaltos cortados de curado lento (*slow curing*), se mezclan con aceites para darle fluidez, actualmente están descontinuados en el país.

Los asfaltos cortados (AC), no deben emplearse en días de lluvia o con amenaza de lluvia, ni con temperaturas inferiores a 10°C y en superficies húmedas [23].

2.4.1.3 Emulsiones Asfálticas

Son de cemento asfáltico, son un sistema heterogéneo de dos fases inmiscibles entre sí (asfalto y agua), con estabilidad variable. Su color de emulsión asfáltica antes del quiebre es marrón y después del quiebre negro. Su uso se ha masificado debido a que no produce contaminación ya que el solvente que usa es agua, razón por la que han ganado espacio en el mercado [21].

El tiempo de quiebre y la viscosidad de las emulsiones dependen entre otros factores, de la calidad y la cantidad de emulsificantes y aditivos químicos utilizados. Se clasifican de acuerdo a la carga eléctrica de la partícula en:

- Catiónica (utilizadas en pavimentos).
- Aniónica. (utilizada en aplicaciones industriales) [21].

En cuanto al tiempo de quiebre, se clasifican en:

- Quiebre rápido CRS.
- Quiebre medio CMS.
- Quiebre lento CSS.
- Quiebre controlado CQS [21].

Las emulsiones asfálticas de quiebre rápido debido a su excelente adherencia a todo tipo de áridos son el ligante más apropiado para la confección de tratamientos superficiales.

Las emulsiones de quiebre lento CSS se utilizan en riegos de liga, en la elaboración de lechadas asfálticas (*slurry seal*) y riegos negros (*fog seal*).

Las emulsiones asfálticas de quiebre medio y lento se utilizan en mezclas en frío, ya sea en planta o en sitio.

Las emulsiones de quiebre controlado (conocidas como *quick setting*) se utilizan en operaciones en terreno donde el quiebre de la emulsión es fundamental para una buena ejecución, como por ejemplo obras de rápida apertura al tránsito [21].

2.5 Mezclas Asfálticas

Las mezclas asfálticas están formadas por áridos más un ligante asfáltico. El árido y el ligante asfáltico son previamente seleccionados, el árido es recubierto uniformemente por una película de bitumen, y luego esta mezcla es sometida a compactación, resultando una capa sólida y resistente. La dosificación relativa de los materiales que componen la mezcla asfáltica determina las propiedades y características mecánicas de esta, dicha mezcla debe ser capaz de soportar las cargas y el desgaste del tránsito vehicular, la mezcla asfáltica compactada debe permitir el traspaso de los esfuerzos hacia las capas inferiores, disipando la energía generada por la sollicitación. En la Figura 2.11 se ilustra el traspaso de carga hacia las capas inferiores [24].

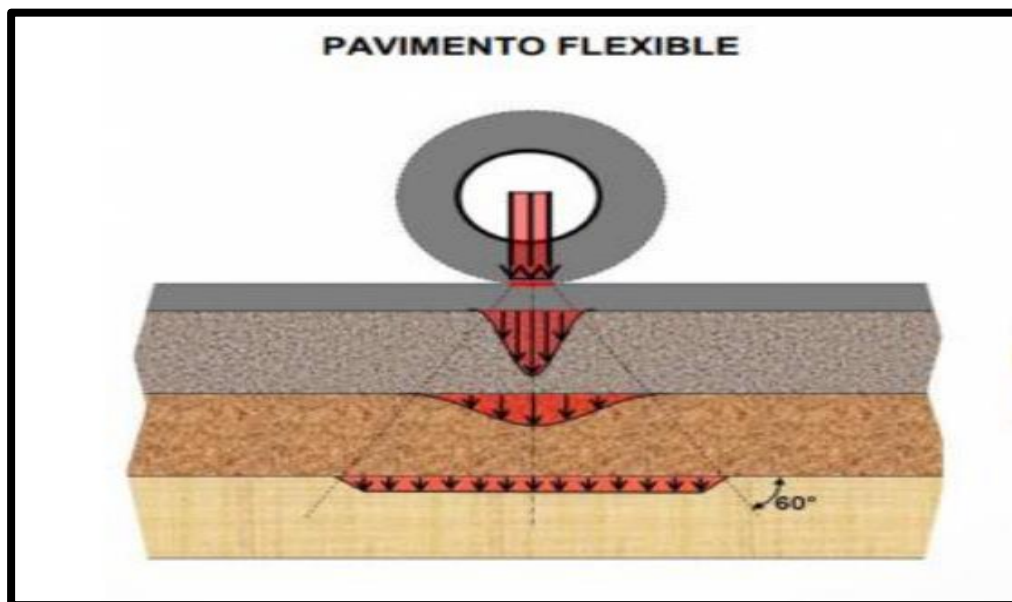


Figura 14- Transmisión de cargas sobre un Pavimento Flexible. Fuente [10].

Las mezclas asfálticas pueden fabricarse en caliente o en frío, siendo las más comunes las mezclas asfálticas en caliente (MAC). Las mismas se comportan de distintas formas de acuerdo con las temperaturas y otros factores ambientales a los cuales son sometidas.

Una mezcla asfáltica ideal debe tener las siguientes características:

- Baja rigidez o viscosidad a las temperaturas normales de manejo en planta y colocación en obra para una adecuada trabajabilidad.
- Alta rigidez a las temperaturas altas de servicio para reducir los ahuellamientos.
- Baja rigidez y buenas características elásticas a temperaturas bajas de servicio para reducir el riesgo de la aparición de fisuras por cambios de temperaturas.
- Buenas características adherentes en presencia de humedad, con el propósito de reducir el *stripping* [23].

A elevadas temperaturas de servicio, puede que el cemento asfáltico llegue a reblandecerse, facilitando la deformación de la carpeta de rodado. Por otro lado, a temperaturas de servicio bajas, el ligante se vuelve relativamente rígido y va perdiendo capacidad de deformación, volviéndose más frágil y siendo susceptible a fisuras. Al disminuir el endurecimiento de la mezcla, se minimizará el riesgo a falla por fragilidad.

2.5.1 Tipos de Mezclas Asfálticas

La clasificación de las mezclas asfálticas es variada, dependiendo del parámetro de aplicación, de la granulometría o de los materiales que la componen. Se puede clasificar en:

Según su temperatura de puesta en obra:

- Mezclas asfálticas en caliente.
- Mezclas asfálticas en frío.

Según su porcentaje de huecos:

- Cerrada: huecos mayores a 6%.
- Semi Cerrada: huecos entre 6% a 12%.
- Abierta: huecos mayores a 12% [12].

Tamaño del árido o textura superficial:

- Gruesa: T_{máx} mayor a 5mm.
- Finas: T_{máx} menor a 5mm [12].

Según su granulometría, referido al porcentaje de material que pasa por el tamiz N°8, Tabla 2.1.

Tabla 2.1- Clasificación de Mezclas Asfálticas según Granulometría. Fuente [23].

Tipo de Gradución	Porcentaje que pasa Tamiz N°8
Abierta	5-20
Gruesa	20-35
Semi-Densa	28-42
Densa	35-50
Fina	>50

2.5.1.1 Mezclas Asfálticas en Caliente

Se denominan mezclas en caliente (MAC), a la combinación uniforme de áridos y ligante asfáltico, para cuya realización es necesario un calentamiento de los componentes, para lograr que los áridos se mezclen homogéneamente con el asfalto, ambos elementos participantes se llevan a temperaturas altas muy superiores a las del ambiente, temperaturas superiores a los 120 °C. En general, su fabricación se realiza en una planta asfáltica, y luego se transporta la mezcla a terreno y se coloca por medio de una pavimentadora o *finisher*, asegurándose que la superficie del terreno se encuentre preparada correctamente. Una vez extendida, se somete a un proceso de compactación y se obtiene así una superficie suave y bien consolidada. El estado óptimo para entrar en servicio y obtener la resistencia mecánica adecuada de esta mezcla se consigue cuando la mezcla alcanza la temperatura ambiente [24].

2.5.1.2 Mezcla Asfáltica en Frío

Es aquella en que para su elaboración y puesta en obra se realiza a bajas temperaturas y se extiende y compacta a temperatura ambiente, no menos de 10°C, sin lluvia ni bruma. El quiebre se produce cuando se evapora el solvente utilizado para disminuir la viscosidad, logrando su resistencia final [12].

2.5.2 Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente

Para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente, el árido y el ligante asfáltico son combinados en dosificaciones exactas definidas de acuerdo con requerimientos del camino. Las características y proporciones relativas de estos materiales establecen las propiedades mecánicas de la mezcla, si a la mezcla se le agrega un material adicional, como en este caso, una fibra, o se cambia la dosificación del bitumen se modifican inmediatamente las propiedades de la mezcla asfáltica y el desempeño de esta como pavimento terminado. El *método Marshall* y el *método superpave*, son las dos metodologías utilizadas en el país para determinar la dosificación óptima entre cantidad de ligante y agregado mineral. Para este trabajo de título se utilizarán ambos métodos dependiendo del ensayo y tipo de probetas asfálticas que se requiera elaborar.

Los métodos de diseño recién mencionados tienen características y ventajas singulares. El Método Marshall se basa principalmente en la estabilidad y contenido de vacíos y el método superpave se basa en el contenido de vacíos. Cualquier método puede ser usado con resultados satisfactorios. La selección del método a utilizar es, principalmente, materia de preferencias en ingeniería.

Una Probeta de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada y probada bajo distintos parámetros y ensayos que simulan condiciones reales para determinar el posible desempeño en la estructura del pavimento de un camino. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla, y la incidencia que estas puedan tener en el desempeño de la mezcla en un camino. Las cuatro características son [22]:

- Densidad de la mezcla.
- Vacíos de aire.
- Vacíos en el agregado mineral.
- Contenido de asfalto [12].

Las dos metodologías de diseño recomendadas por las normativas vigentes en el país pueden ser utilizadas para analizar muestra en laboratorio o testigos de carpetas de rodado ya terminadas, se utilizan tanto para diseñar como también para verificar el diseño de la mezcla asfáltica en caliente.

2.5.2.1 Densidad

La densidad de la mezcla compactada está definida como la masa de un volumen específico de la mezcla. Es una característica muy importante en el control de calidad, debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento para obtener una mejor y más duradera carpeta de rodado. A veces un exceso de densidad puede producir efectos negativos.

La densidad patrón corresponde a la obtenida en laboratorio, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es o no adecuada. La densidad de la mezcla compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico. Las especificaciones generalmente demandan que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad patrón. El control final de la densidad de un pavimento se denomina porcentaje de compactación, para cemento asfáltico el porcentaje de compactación exigido tiene que ser mayor al 98 % [23].

2.5.2.2 Vacíos de Aire

Lo vacíos de aire o huecos en mezcla son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, entre los agregados revestidos con bitumen en la mezcla compactada. Es preciso que todas las mezclas alcancen un cierto grado de vacíos de aire para permitir alguna compactación complementaria bajo la acción de las cargas del tráfico vehicular, y suministrar espacios donde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos depende del diseño específico de cada carpeta de rodado y generalmente varía en un rango de 4% - 6 % para pavimentos de la Región de Valparaíso [12].

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos, mientras menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un porcentaje muy alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por donde puede escurrir agua y aire, que provocan daño al pavimento, el agua es uno de los agentes más perjudiciales. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; esto es el exceso de asfalto exprimido hacia la superficie. La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre mayor densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones recomiendan un óptimo entre la densidad y el contenido de vacíos menor a 8% [23].

2.5.2.3 Vacíos en el Agregado Mineral (VAM)

Los vacíos en el agregado mineral son los espacios de aire que se ubican entre las partículas de árido incluyendo los espacios llenos de ligante en una mezcla ya compactada [12].

El VAM muestra el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto, ósea todo el asfalto sin considerar la porción que se pierde en el agregado pétreo. Cuando mayor sea el VAM más espacio se tendrá para la película de asfalto. El tamaño del agregado mineral define los valores mínimos de VAM especificados en Manual de Carreteras, Mientras más gruesa sea la película de ligante que cubre las partículas de árido, más durables será la mezcla. El tamaño máximo del agregado mineral según la banda granulométrica que usaremos es de 19 mm por lo que se requiere un VAM mínimo de 14%. En la tabla 2.2 se muestra los distintos valores de VAM según el tamaño del máximo nominal [23].

Tabla 2.2 - Mínimo porcentaje de VAM en relación al Tamaño Máximo de las Partícula. Fuente [23].

Tamiz	Tamaño máx. nominal de partículas		Mínimo % de vacios (VAM)
	Pulgadas	mm	
Nº 16	0,0469	1,18	23,5
Nº 8	0,093	2,36	21,0
Nº 4	0,187	4,75	18,0
3/8	0,375	9,5	16,0
1/2	0,500	12,5	15,0
3/4	0,75	19,0	14,0
1	1,0	25,0	13,0
1 (1/2)	1,5	37,5	12,0
2	2,0	50,0	11,5
2 (1/2)	2,5	63,0	11,0

Para que la carpeta de asfalto tenga una mayor durabilidad, el VAM debe estar sobre el valor mínimo. De existir un VAM por debajo del mínimo especificado, puede resultar en una película delgada de asfalto, esto puede ser perjudicial para la calidad del pavimento, disminuir el VAM para economizar el contenido de asfalto es un mal criterio. En la figura 2.12 están representados los distintos volúmenes existentes en una carpeta de rodado asfáltico, y muestra ilustrativamente el contenido de VAM en una mezcla compactada.

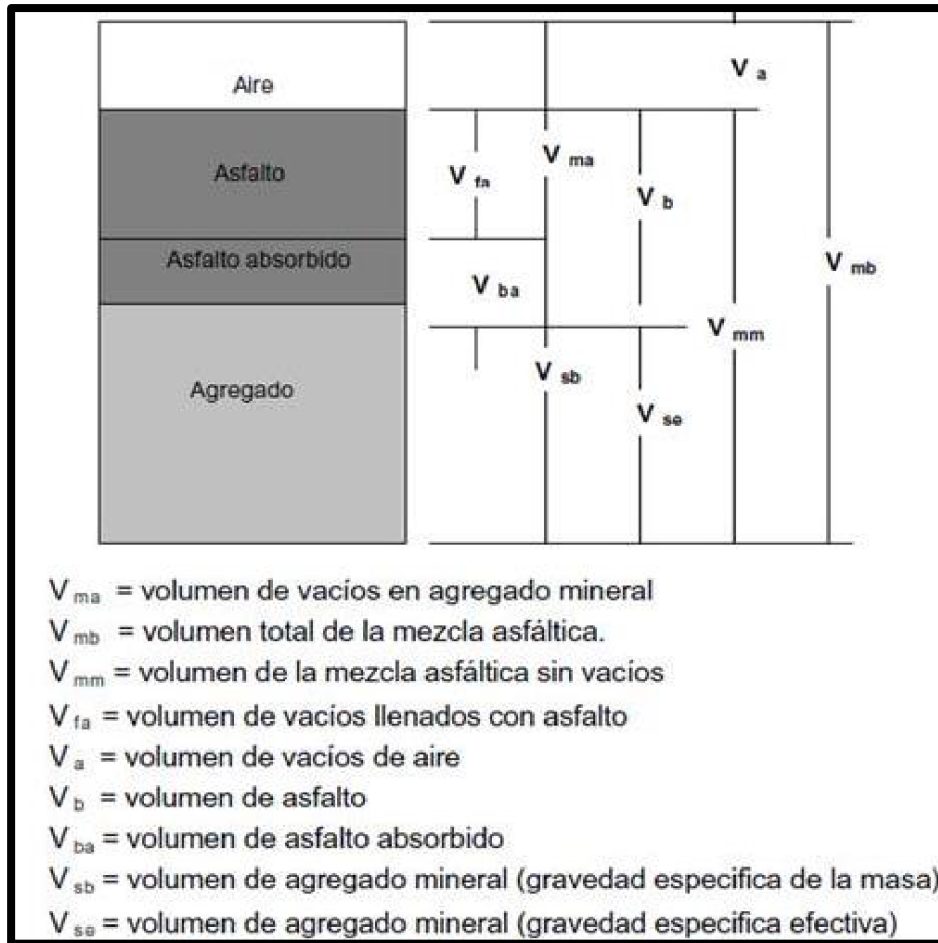


Figura 15- Distribución de Volúmenes Pavimento Asfáltico. Fuente [23].

2.5.2.4 Contenido de Asfalto

La cantidad a utilizar de asfalto es de suma importancia y debe determinarse de forma exacta en laboratorio de acuerdo a las normativas vigentes, y luego controlada con precisión en la obra. El porcentaje óptimo de asfalto de una mezcla se determina usando los métodos mencionados; método de diseño Marshall o Superpave de acuerdo a la preferencia del laboratorio. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las propiedades de los materiales constituyentes, tales como, la granulometría y la capacidad de absorción del agregado pétreo [12].

La proporción óptima de asfalto en una mezcla está relacionada directamente con la granulometría de los áridos que la componen. Una mayor cantidad de finos en el agregado indica que mayor será el área superficial total, por lo tanto, la mezcla necesitará una mayor cantidad de asfalto. Por otro lado, las mezclas con menor cantidad de finos, tendrá una menor superficie que cubrir (menor área superficial) y menor absorción de asfalto exigiendo menos cantidad. La cantidad de relleno mineral, partículas de árido que pasa bajo la malla (Nº 200), define si una mezcla es húmeda o seca, a menor cantidad de relleno mineral se obtendrá una mezcla húmeda (rica) o una en el caso contrario una mezcla seca o pobre (inestable) [12].

Además, la capacidad de absorción del agregado es fundamental para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que hay una cantidad de asfalto que es absorbido y una cantidad de ligante que recubre las partículas del agregado, se habla de; contenido de asfalto y contenido efectivo de asfalto. El contenido total de asfalto es la cantidad total que crea las cualidades deseadas de la mezcla, y el contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto que forma una película de ligante efectiva sobre la superficie de las partículas.

2.5.3 Mezclas Asfálticas Modificadas

Las mezclas asfálticas se componen básicamente de dos elementos, el agregado mineral (partículas pétreas de diferente granulometría) y el asfalto (ligante), estos dos elementos le dan ciertas características a la mezcla, pero en el común de los casos se necesitan mejorar o incorporar algunas propiedades a la mezcla, por esto se agrega uno o más de un nuevo elemento con el fin de aumentar la vida útil del pavimento, a esto se le llama una mezcla asfáltica modificada.

Este nuevo material agregado a la mezcla original puede ser diluido o incorporado, generalmente es un polímero que pretende mejorar las propiedades físicas y reológicas. Los beneficios que generalmente se buscan al modificar la mezcla tradicional son:

- Aumentar la durabilidad del pavimento.
- Disminuir la susceptibilidad térmica.
- Aumentar la resistencia a fatiga de las mezclas.
- Mejorar la adhesión del asfalto con los agregados pétreos.
- Mejorar la cohesión, brindando mejor retención de los agregados.
- Reducir el envejecimiento en servicio, ampliando la vida útil de las mezclas asfálticas.
- Disminuir el costo de la obra (disminución espesor de capa).
- Minimizar costos o aumentar la factibilidad de la obra (disminuir tiempo de construcción) [12].

Producto de las necesidades de mejora mencionadas, nacen los asfaltos modificados, los cuales son el producto de la disolución de un aditivo (polímero o caucho molido) en el asfalto como se muestra en la figura 2.13. Se utilizan en mezclas drenantes, microaglomerados discontinuos en caliente y en mezclas asfálticas en caliente donde se demanda altas cargas, alto tránsito vehicular (ejes equivalentes) y condiciones climáticas adversas, uno de los polímeros más utilizados es el SBS (estireno-butadieno-estireno) [12]. Las propiedades que se busca obtener son:

- Mayor cohesión.
- Mejor respuesta elástica.
- Mayor rango de plasticidad (diferencia entre el punto de ablandamiento y el Índice de Fraass).
- Mayor resistencia al envejecimiento.
- Mayor resistencia a la acción del agua.

Estas propiedades dependen de los siguientes factores:

- Tipo y composición del polímero.
- Característica y estructura coloidal del asfalto base.
- Porcentaje de polímero agregado al CA [21].

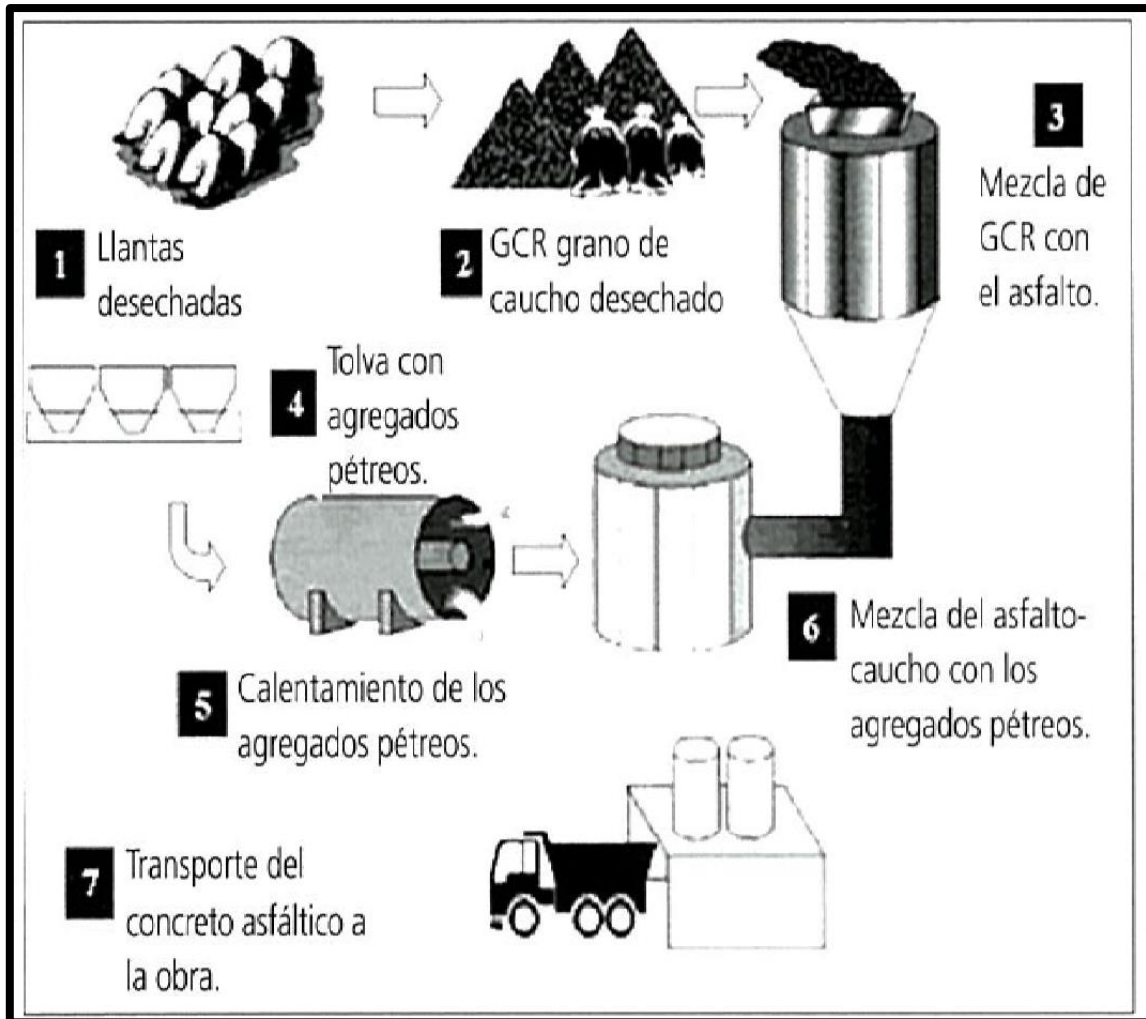


Figura 16- Proceso mezcla asfáltica modificada con caucho. Fuente [21].

Para el caso de estudio, se incorpora una fibra sintética a la mezcla asfáltica, para mejorar el comportamiento de las mezclas tradicionales ante la fisuración (grietas por reflexión), que se producen por factores térmicos y de tráfico vehicular.

2.6 Las Fibras

2.6.1 Definición y Tipos de Fibras

Una fibra técnicamente es un material sólido relativamente flexible, con una limitada sección transversal y en ocasiones elevada relación longitud-anchura, se clasifican en tres grandes grupos: las fibras naturales, artificiales y sintéticas.

Las fibras naturales: son muy comunes como, por ejemplo, pelo, pasto seco (paja), el hombre ha utilizado fibra de distintos materiales a lo largo de la historia dependiendo de su necesidad, como en el caso de las telas y los materiales de construcción; un ejemplo muy antiguo del uso de fibras para mejorar materiales de construcción, es el adobe que lleva incorporada paja.

Gracias a los avances tecnológicos el hombre descubrió y creó nuevas fibras, para satisfacer sus necesidades, en el año 1855 se creó la primera fibra artificial.

Las fibras artificiales: poseen propiedades similares a las naturales. Pueden obtenerse a partir de proteínas vegetales o animal. Surgen de la necesidad de obtener filamentos largos y resistentes, para tejer elementos textiles de calidad. Se dividen en tres grupos dependiendo de la materia prima de la que se obtienen:

- *Celulósicas:* Son derivados industriales de la celulosa, Se produce mediante la extracción de la pulpa, mediante un proceso químico se convierte en fibra.
- *Proteínicas:* Se produce a través proteína animal o proteína vegetal, su nombre genérico es *azlon*.
- *Algínicas:* Se llaman rayón alginato. Se basa en el alginato de sodio.

Las fibras sintéticas: son aquellas obtenidas a partir de polímeros sintéticos derivados del petróleo, es una fibratextil que se produce por síntesis orgánica. Las más comunes son:

- Poliéster.
- Acrílico.
- Polipropileno.
- Nylon.

Las fibras artificiales no son sintéticas, pues proceden de materiales naturales, básicamente celulosa. Algunas veces la expresión «fibras químicas» se utiliza para referirse a las fibras artificiales y a las sintéticas en conjunto, en contraposición a fibras naturales.

2.6.2 Las Fibras en Mezclas Asfálticas

El uso de fibras para fortificar los materiales de construcción puede parecer una idea nueva, pero sus raíces se remontan a miles de años en el antiguo Egipto cuando se agregaron “fibras” de paja cruda a los ladrillos y bloques de construcción de arcilla y barro. Aunque de diseño primitivo, estas fibras proporcionaron una estructura y dureza que los constructores egipcios consideraron muy beneficiosas, se obtuvieron resultados similares agregando pelo de caballo o de cerdo al yeso como método de refuerzo, estos nuevos métodos fueron innovadores para la época y aun se utiliza su concepto base, que consiste básicamente en agregar fibras tridimensionales para mejorar el comportamiento de un material frente a una condición adversa [9].

Siglos más tarde, los avances científicos e investigación de materiales ha transformado y revolucionado este concepto básico. Al combinar materiales sintéticos de la era espacial a la ingeniería vial, suministrando al mercado internacional de la construcción de vías vehiculares una gran gama de fibras para pavimentos que minimizan las fallas mecánicas y físicas, mejorando el servicio y vida útil de las mezclas asfálticas [9].

Hoy en día tenemos una gran variedad de avances en materiales y métodos de diversos tipos que aportan al diseño y durabilidad de los caminos de pavimentos flexibles. Las mezclas asfálticas modificadas con fibras sintéticas permiten obtener un pavimento con mejores respuestas a los cambios térmicos, así como también se aumenta la resistencia a la fisuración por fatiga y los envejecimientos prematuros, aumentando la vida útil del pavimento y disminuyendo los costos de mantención [25].

2.6.3 Fibra FORTA-FI de Forta Corporation

FORTA Es una empresa que desde sus comienzos ha realizado diversos estudios en conjunto con distintitos organismos para descubrir nuevas fibras, avances y aplicaciones en beneficio de las vías de transporte y materiales de construcción. FORTA ha investigado, fabricado, distribuido y probado en laboratorio y en terreno fibras de refuerzo de concreto y asfalto adaptadas a aplicaciones específicas y a las demandas de una comunidad de construcción global en constante expansión [25].

En 1982, FORTA CORPORATION logró sus primeras patentes en el desarrollo de tecnologías con fibras para reforzar mezclas asfálticas. En 2008 se llevó a cabo su último proyecto de investigación con la Universidad Estatal de Arizona, dando muy buenos resultados con su actual generación de fibras FORTA-FI para reforzar mezclas asfálticas [9]. Resultados comprobados en terreno, recapados realizados en Arizona, México, y Colombia entro otros países han demostrados los valiosos beneficios de esta innovación.

Una alternativa para reforzar los materiales de construcción consiste en añadir fibras al material para agregar tenacidad, resistencia y durabilidad, mejorando propiedades a fin de lograr los resultados deseados. FORTA CORPORATION aprovechó ciertas características de algunas fibras para desarrollar FORTA-FI mezcla de fibras extremadamente fuertes, químicamente inertes, que se mezclan de forma rápida y son distribuidas de manera uniforme en las mezclas asfálticas. Una vez adicionada a cualquier tipo de mezcla, las fibras FORTA-FI actúan como refuerzo tridimensional isótropo (*iguales propiedades y refuerzo en todas las direcciones*) a lo largo de la capa asfáltica, mejorando considerablemente las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas [9].

Las fibras FORTA-FI principalmente contienen una mezcla de fibras de Aramida (*Kevlar*) y Polipropileno, *Kevlar* nombre comercial de la marca. La empresa Dupont elaboró por primera vez fibras de *Kevlar*, la encargada de este acierto científico fue la química polaco-estadounidense *Stephanie Kwolek*, quien desarrollo un tipo de polímero que contienen enlaces del tipo amida. Las poliamidas se pueden encontrar en la naturaleza en forma de lana o seda, y de forma sintética como el *nylon* o el *Kevlar*. Las poliamidas se clasifican según su estructura molecular, la familia de las poliamidas que está presente en esta fibra son las aramidias, una abreviación del término "*aromatic polyamide*" (poliamida aromática) que presentan una estructura principal de hidrocarburos aromáticos, esta fibra vanguardista desarrollada por Dupont llego a revolucionar la industria armamentista, ya que es un material muy resistente y ligero [26].

Se han realizado pruebas de laboratorio y en obra para demostrar los beneficios de rendimiento que proporciona la introducción de la fibra de *Aramid* en las mezclas bituminosas; este polímero completamente alineado proporciona propiedades térmicas, de rigidez y resistencia. Algunas propiedades mecánicas de esta fibra [26] se observan en la tabla 2.3 a continuación:

Tabla 2.3 - Algunas propiedades mecánicas del Kevlar.

Propiedades	Unidades	<i>Kevlar</i>
Rigidez	GPa	120
Resistencia	GPa	3,5
Elongación de Rotura	%	3,6 > acero
Tenacidad	(MJ/m ³)	50

2.7 Recapado Asfáltico

Es un método de rehabilitación de caminos ampliamente utilizado, se basa principalmente en la renovación de la carpeta de rodados, colocando una nueva carpeta sobre el camino existente, en algunos casos se retira la capa y se reemplaza por una nueva y en otros casos se aplica directamente una capa de mezcla asfáltica sobre la carpeta ya existente. Una de las principales ventajas es la velocidad de la rehabilitación del camino, y una desventaja es la poca durabilidad de la nueva carpeta implementada, ya que afloran las fallas de la carpeta de rodado anterior. Esta falla se conoce como falla por reflexión, estas grietas no son más que una imagen reflejada de las fisuras o juntas de dilatación que el pavimento pretende recuperar y su surgimiento indica inequívocamente un proceso de destrucción del recapado, esta falla es la que se intentara prevenir y retardar el mayor tiempo posible con FORTA-FI para lograr una mayor durabilidad del recapado asfáltico [28].

Existen en el mercado numeroso productos y métodos para mejorar la vida útil de los recapados asfálticos, uno de ellos es la geomalla o geogrilla, estos métodos si bien son beneficiosos incluyen un proceso extra en su aplicación lo que aumenta el costo de la obra. FORTA-FI requiere una sencilla aplicación que toma sólo unos segundos por lo que no incorpora un proceso extra y si es así no involucra una demora importante en la instalación que pueda alargar el proceso de forma considerable, pero si agrega beneficio y nuevas propiedades al recapado [25].

Estudios realizados en Temple Arizona han arrojado resultados favorables en la implementación de esta innovadora fibra en recarpeteos asfálticos, mejorando el comportamiento ante la fatiga y fisuración ascendente, falla típica en recapados asfáltico, aumentando la vida útil y disminuyendo sus costos de mantención una de las principales desventajas de los recapados asfálticos [27].

2.7.1 Criterios Básicos de Diseño para Reposición de Pavimento (Recarpeteo)

La rehabilitación de pavimento asfáltico envuelve una gran cantidad de técnicas y procedimientos cuya finalidad es mejorar la capacidad estructural y funcional de un pavimento. El mantenimiento vial también es considerado como una rehabilitación, pero es muy distinto a un recarpeteo ya que no involucra un diseño [28]. Acá se menciona los criterio y métodos recomendados por el manual de carreteras en su volumen 3 para diseñar un recapado asfáltico, criterios que se tomaran en cuenta para aplicar la fibra FORTA-FI al mercado nacional, con el objetivo de extender significativamente la vida útil de una superestructura.

El recarpeteo se diferencia de la repavimentación principalmente en el diseño, ya que en la repavimentación (reconstrucción) se retira previamente el pavimento o no trabaja conjuntamente con la nueva estructura [28], independiente de esta diferencia FORTA-FI debería mejorar la capacidad de ambos métodos de rehabilitación de caminos ya que mejora las propiedades de la mezcla asfáltica.

La mejor solución técnica y económica para mejorar las condiciones de una carpeta de rodado consiste en investigar y diseñar el procedimiento más apropiado para los distintos tipos y origen de deterioro que está presente [28]. El origen de cada deterioro suele estar asociado a un conjunto de factores y sucesos, por lo que resulta bastante complejo encontrar un diseño que se adapte a cada situación particular. Mucho de los avances para mejorar el comportamiento estructural de un recarpeteo se encuentran en etapas de experimentación, por lo que la rehabilitación de un camino requiere de una combinación de ciencia y arte, ya que en cada proyecto se debe realizar una gran cantidad de análisis en conjunto con un buen sentido ingenieril [28].

Debido a la complejidad de encontrar la combinación de soluciones para obtener un adecuado recapado asfáltico, es conveniente tener presente una serie de recomendaciones que asegure tener la información adecuada de los factores que el diseño requiere [28]. Las recomendaciones básicas propuestas en el Manual de Carreteras son las siguientes.

2.7.1.1 Diagnóstico

Antecedentes: Se realiza un diagnóstico para determinar las causas del deterioro de un pavimento, se debe hacer un análisis minucioso del estado y comportamiento de éste, con el fin de recopilar la mayor información del camino que se quiere subsanar, este procedimiento es esencial para encontrar la solución adecuada [28].

Es valioso contar con antecedentes históricos del camino, tales como año de construcción, geometría de la estructura, condiciones de drenaje, condiciones ambientales, características de los suelos de la subrasante, eventuales mantenimientos, etc [28]. La dirección de vialidad tiene disponibles un inventario vial y mediciones del IRI actualizadas que se pueden consultar. El IRI (índice de rugosidad internacional) es un indicador de la condición en que se encuentra un pavimento [28].

Balizado: Se debe realizar un balizado del pavimento, señalando cada 20 m, como máximo y escribiendo el kilometraje cada hectómetro. Para evitar errores de distancia el balizado se debe ir cerrando, aproximadamente cada 1000 m, contra mediciones realizadas con instrumental topográfico que asegure una precisión del orden de +50 mm cada 1000 m [28], generalmente y dependiendo del tipo de camino, las medidas se realizan por el eje, y se señalan en el borde de las calzadas.

Monografía: Es fundamental preparar una adecuada monografía que diagnostique la situación actual del pavimento, se recomienda preparar una monografía detallada, en dos fases o etapas para la correcta rehabilitación del camino [28].

Para la etapa de diagnóstico se necesita una monografía detallada del tipo de deterioro que atribuye el pavimento, especificando la extensión y tipos de fallas, de manera de tomar la mejor decisión para el mejoramiento del mismo, evaluar sus costos y otros factores. Toda monografía debe prepararse ajustándose a las normativas vigentes [28].

La segunda etapa consiste en recopilar la información específica que requieren los procedimientos de rehabilitación adoptados y el tipo de información disponible [28].

Ante de realizar cualquier procedimiento de recarpeteo se debe identificar si el pavimento necesita reparaciones previas, se debe detectar con exactitud las características y extensión de los deterioros que requieran trabajo previo [28].

Si se cuenta con el número estructural efectivo del pavimento existente (NE_{ef}) determinado por retroanálisis de mediciones de flexión, no se necesitará más información de la ya mencionada [28].

De no contar con (NE_{ef}) determinado por retroanálisis, se necesitará incluir en la monografía una descripción detallada del tipo y nivel de deterioros que presente el pavimento, para determinar el (NE_{ef}) por el método que se indicará más adelante [28].

La clasificación y niveles de severidad se encuentran en el anexo Catálogo de deterioros de pavimento incluido en el "Manual de Carretera Volumen 7 (Mantenimiento vial)" [28].

Informe diagnóstico: Debe ser prepara por un ingeniero especialista en diseño de pavimentos y su objetivo es definir las causas del deterioro, debe justificar con los antecedentes disponibles la solución propuesta, el informe debe incluir los siguientes aspectos [28]:

"Descripción de las características generales del pavimento; año de construcción, espesores de las diferentes capas, ancho de la calzada, características y estado de las bermas, mantenimientos importantes que se hubieran realizado, valores de IRI y al deslizamiento, si estuvieran disponibles, etc. También debe incluir una descripción de la situación de la sección transversal especialmente en los que se refiere a bombeos y peraltes de las curvas horizontales" [28].

“Descripción del estado del pavimento (monografía), indicando superficie o longitud aproximada de las fallas más características, niveles de escalonamiento de juntas, cantidad de losas con más de 3 quebraduras y/o inestables y evidencias de urgencia de finos (pumping) en pavimentos de hormigón, niveles de ahuellamientos y áreas severamente agrietadas indicando probable origen de las mismas, en los asfaltos toda otra información de interés para definir y caracterizar la situación del pavimento, tal como se indica en el instructivo para la inspección de pavimentos individualizado antes” [28].

“Identificación de las eventuales limitaciones o restricciones para materializar las diferentes soluciones, que pudiera existir. Deberá ponderar, al menos factores tales como: disponibilidad limitada de recursos, problemas para el manejo del tránsito durante la construcción, vida útil remanente y agregada por las soluciones alternativas, restricciones de la geometría de la ruta, disponibilidad de faja fiscal, existencia de servicios públicos, etc” [28].

“Estimación de las cantidades de obras para reparaciones previas, asociadas a él o los procedimientos de reposición que se proponen” [28].

“Justificación de él o los tipos de reposición que se proponen, indicando una estimación de las investigaciones asociadas a cada uno de ellos” [28].

Ya identificado el problema y definido el conjunto de las potenciales soluciones, se debe fijar cuál es la más conveniente para la situación singular que se está examinando. Para la cual se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones [28]:

“El procedimiento de reposición más efectivo son los que van directamente dirigidos a solucionar las causas que están originando el deterioro y que previene que este vuelva a repetirse” [28].

“Aun cuando pueda resultar fácil programar un arreglo a la rápida, o peor aún un arreglo tipo cosmética, ello siempre resultará en una solución indeseable. Los fondos que se invierten en soluciones de este tipo son recursos malgastados; si no se tratan los mecanismos que están originando el deterioro estos se repiten con una intensidad creciente. Los beneficios de corto plazo derivados de reparaciones superficiales nunca justifican la inversión requerida; este tipo de tratamiento no es intrínsecamente malo es simplemente antieconómico” [28].

“En general, las reposiciones solo deben programarse para sectores en que el pavimento se encuentra seriamente deteriorado. Así, por ejemplo, en una calzada unidireccional con pavimento de hormigón, puede que solo la pista externa se encuentre seriamente deteriorada; en tal caso solo debe reponerse esa pista. Lo anterior no significa que para los tramos no incluidos en la reposición no se programen obras de reparación que pueden ser de menor envergadura” [28].

“Las soluciones detectadas pueden incluir más de una técnica de reposición” [28].

“La solución más adecuada, para cada caso particular, se determina sopesando las ventajas de las diferentes alternativas detectadas contra las restricciones que representa el proyecto. La solución adecuada y factible es aquella que, junto con reparar los deterioros existentes, previene que ellos se vuelvan a repetir, mientras satisfacen las restricciones impuestas” [28].

Definidos el o los tipos de restitución a realizar, se debe planificar y determinar los alcances adicionales que se requieren del terreno (recopilación de datos), una monografía detallada de la carpeta de rodado a remplazar y datos de la condición de los suelos, subrasante, estado y condiciones de las distintas capas estructurales existentes en la zona a recapar, obtenidas de preferencia mediante mediciones de deflexiones con un deflectómetro de impacto [28].

2.7.1.2 Consideraciones Importantes para el Diseño de Recarpeteos

Reparaciones previas: independiente del tipo de recapado a instalar, se requiere de ciertas reparaciones previas, para limitar cualquier eventualidad que afecte la nueva carpeta instalada, cabe señalar que existen fallas visibles y otras que son imperceptibles y deben identificarse por otros medios [28].

La cantidad y particularidad de las reparaciones están directamente relacionadas con el tipo de recapado a colocar y del nivel de deterioro que presente el pavimento, definiendo en el diseño el comportamiento estructural de la nueva carpeta y de la superestructura [28].

Reflexión de grietas: la reflexión de grieta es uno de los principales agentes que afectan un recarpeteo asfáltico, los métodos de diseño utilizados en Chile no consideran los efectos de la reflexión de grietas, ya que la mayoría de las nuevas tecnologías y avances desarrollados aún están en etapa experimental o son de alto costo [28]. Aun así la dirección de vialidad del país ha implementado con éxito ciertos criterios para mitigar la aparición de grietas ascendentes, estos son:

“Como norma general, entre mayor es el espesor del recapado más se retarda la aparición de grietas reflejadas. Sin embargo, casi nunca resulta recomendable aumentar el espesor más allá de ciertos límites solo para disminuir este efecto” [28].

“Se han obtenido excelentes resultados al incluir en los recarpeteos asfálticos sobre pavimento de hormigón, una base asfáltica de granulometría abierta. Para caminos rurales, donde existe un número significativo de camiones pesados, recarpeteos de un espesor total igual o superior que unos 120 mm, incluyendo la capa de granulometría abierta, han retardado significativamente la aparición de grietas reflejadas” [28].

“Antes de recarpetear con asfalto un pavimento de hormigón se deben reparar o reemplazar las losas muy quebradas (3 o más grietas) que presenten signos de estar trabajado (las juntas presentan saltaduras de borde)” [28].

“Antes de recarpetear con asfalto un pavimento asfáltico, se deben reemplazar todas las áreas que presenten agrietamiento por fatiga de alta severidad y cualquier otra zona inestable. Los conceptos de nivel de severidad son los que se indican en el M.C. vol. 7 (Mantenimiento Vial, anexo catálogo de deterioros de pavimento)” [28].

“El espesor de un recarpeteo asfáltico sobre un pavimento asfáltico, con propósito de reforzar la estructura de un camino rural con un número significativo de camiones en circulación, no deberá ser inferior a 90 mm. Capas destinadas a una mejora funcional del pavimento pueden tener espesores mucho menores” [28].

“La mayoría de las membranas plásticas fabricadas especialmente para recarpeteos asfálticos sobre capas asfálticas, permiten disminuir o eliminar los espesores adicionales que se suelen colocar para retardar la reflexión de grietas (no incluye disminuciones de espesores de diseño). Sin embargo, debe tenerse en consideración que la efectividad de estos elementos es muy sensible a los procedimientos utilizados al colocarlos” [28].

Ejes equivalentes solicitantes: Se debe calcular los ejes equivalentes acumulados del proyecto durante su longevidad, para ello se deben emplear la metodología correspondiente mencionada en el 3.603.202 (Característica de los parámetros de Diseño) del Manual de Carreteras Volumen 3, los factores equivalentes de cada tipo de recapado son indicados en la tabla 2.4 [28].

Tabla 2.4 - Factores de equivalencia a utilizar. Fuente [28].

Pavimento Existente	Tipo Recarpeteo	Factores a Utilizar
Flexible	Capa Asfáltica	Flexible
Flexible	Hormigón	Rígido
Hormigón	Capa Asfáltica	Rígido
Hormigón Fracturado	Capa Asfáltica	Flexible
Hormigón	Hormigón	Rígido
Hormigón con Recarpeteo Asfáltico	Hormigón	Rígido
Hormigón con Recarpeteo Asfáltico	Capa Asfáltica	Rígido

Drenaje: La humedad es uno de los factores a considerar en el diseño de la rehabilitación de un camino, ya que recurrentemente provoca o agrava el deterioro de un pavimento, al diseñar una recapado se debe investigar si mejorando el drenaje de la plataforma y/o bajo el pavimento, se podría mitigar el deterioro que experimenta el camino [28]. *“Durante los estudios de terreno (incluso durante construcción de un recapado) se debe verificar la eficiencia del sistema de drenaje del pavimento existente y detectar cualquier falla originada en deficiencia de este”* [28].

Ensanches: en ocasiones al realizar un recapado se toma la decisión de ensanchar el camino, adicionando una pista completa o ensanchando una pista antigua angostada por el paso del tiempo [28]. El diseño de este debe considerar y coordinar las variables geométricas, superficiales y estructurales, para esto se requiere coordinar el diseño del recapado y del ensanche, las consideraciones que se deben tener en cuenta son [28]:

“La vida útil tanto del ensanche como del pavimento existente” [28].

“Las características de la sección del ensanche deben ser sensiblemente iguales a las del pavimento existente, incluyendo semejanzas de materiales de refuerzo, espesores y espaciamiento de juntas (se puede utilizar un espaciamiento menor)” [28].

“Es conveniente colocar una membrana separadora a lo largo de la junta longitudinal del ensanche de manera que impida el traspaso de grietas entre uno y otro lado” [28].

“El recarpeteo debe tener, en general, un espesor único tanto en la pista antigua como en el ensanche” [28].

“Deben colocar drenes de pavimento, salvo que un estudio asegure que no resultan necesarios” [28].

2.7.1.3 Evaluación de Pavimento Existente

Tramos uniformes: El diseño del recarpeteo debe dividir el camino en tramos de acuerdo a las características y fallas que cada sección tenga, estableciendo criterios de diseño de forma independiente para cada tramo, se definen las variables y espesores respectivos de cada segmento, según factores; como espesor, número de grietas por kilómetro, módulo resiliente o capacidad de soporte [28].

Condición funcional: Hace mención de los factores que afectan a los usuarios, tal como la serviciabilidad y condición funcional. A continuación, se describe algunos deterioros funcionales y la forma de tratarlos [28]:

“En todo tipo de pavimento, una resistencia al deslizamiento insuficiente originada en agregados pulidos, exudación de asfalto, humedad, etc., puede incrementarse mediante algunos de los métodos indicados en el número 6.203.304 del Manual de Carreteras” [28].

“En cualquier tipo de pavimento, las irregularidades de la superficie causadas por ondulaciones pueden corregirse mediante una capa nivelante, es decir, de espesores variables” [28].

“Las irregularidades causadas por un agrietamiento severo y por baches, solo se corrigen temporalmente si se coloca un recapado; la solución integral debe incluir reparaciones en todo el espesor de las áreas deterioradas y la colocación de una capa de características y espesor adecuados para retardar la reflexión de las grietas hacia la superficie” [28].

“Las irregularidades causadas por la pérdida del árido superficial, se pueden solucionar mediante un recapado de poco espesor. En todo caso deben tomarse medidas, incluso removiendo la parte superficial, para asegurar una buena adherencia entre la capa antigua y la nueva; también debe asegurarse que el problema no se origine en una mala adherencia árido-asfalto, pues en tal caso debe removerse toda la capa” [28].

“Las irregularidades causadas por el escalonamiento de las juntas de un pavimento de hormigón pueden aliviarse mediante la colocación de un recarpeteo de espesor adecuado o mediante el cepillado de la superficie. Sin embargo, el escalonamiento está indicando una mala transferencia de cargas entre las juntas y problemas en el drenaje de la subbase, de manera que una solución integral debe considerar estos problemas” [28].

Condición estructural: existen factores que reducen la capacidad del pavimento para soportar las sollicitaciones, la insuficiencia estructural provocada por el paso del tiempo y la repetición de cargas debes ser mitigada reforzando las capas de la superestructura, diseñando mejores y eficientes recapados que incremente capacidad estructural del camino [28].

De acuerdo al tipo de pavimento podemos representar la capacidad estructural, en pavimentos flexibles queda definida por el numero estructural (NE), en los rígidos es el espesor de losa (H) el que define la capacidad, mientras que en pavimentos mixtos (asfalto sobre hormigón) se expresa como un espesor equivalente [28].

La capacidad estructural (deficiencia estructural) que debe suministrar un recapado queda definida por la ecuación 2.1:

$$CE_{rec} = CE_f - CE_{ef}$$

Ecuación 2.1- Capacidad estructural del recapado a colocar.

Donde:

CE_{ef} : Capacidad estructural efectiva del pavimento.

CE_f : Capacidad estructural que necesita para soportar las sollicitaciones previstas.

CE_{rec} : Capacidad estructural del recapado a colocar.

Como se puede apreciar, se debe evaluar adecuadamente la capacidad estructural del pavimento existente, considerando el estado actual del pavimento, así como el comportamiento futuro. Existen varios procedimientos utilizados en ingeniería vial para evaluar el estado de los caminos, siendo los más aceptados los siguientes [28]:

- a) *Método basado en una inspección visual complementada con ensayos de los materiales:* Se determina la capacidad estructural efectiva utilizando toda la información concerniente al diseño, construcción y mantenimiento, seguida de la elaboración de una detallada monografía según lo indicado anteriormente [28].
- b) *Método basado en ensayos no destructivos:* Se recomienda utilizar un deflectómetro de impacto instrumento que permite evaluar las características de la subrasante y de las capas de pavimento, permite determina la eficiencia de la transmisión de cargas en juntas y grietas, estimar el módulo resiliente de la subrasante y calcular el (NE_{ef}) de un pavimento flexible, se recomienda siempre su uso, ya que entrega la información más fidedigna para determinar la capacidad estructural efectiva. No obstante, se debe considerar que los resultados son muy sensibles a pequeñas variaciones de espesor, de manera que se debe chequear para cerciorarse que los valores usados son reales, se debe verificar en terreno con cierta frecuencia los espesores el largo del camino y no utilizar espesores promedios o aproximados [28].
- c) *Método basado en la vida útil remanente:* Se sustenta en el concepto que la capacidad estructural disminuye debido a la repetición de cargas, para calcular la vida útil remanente expresada como porcentaje, estima la capacidad acumulada de las solicitaciones soportadas por el pavimento hasta el momento de análisis (EE_p) y las solicitaciones adicionales ($EE_{1,5}$) necesarias para la falla total de la estructura ósea hasta que el índice de serviciabilidad alcanza el valor de 1,5 y se expresa como la ecuación 2.2 [28]:

$$VR = 100 \left(\frac{1 - EE_p}{EE_{1,5}} \right)$$

Ecuación 2.2- Vida útil remanente (%).

Donde:

VR : vida útil remanente (%).

EE_p : ejes equivalentes acumulados a la fecha de análisis.

$EE_{1,5}$: ejes equivalentes necesarios para llevar a la estructura a un $PI=1,5$.

El número estructural efectivo (NE_{ef}) se determina utilizando la ecuación 2.3, donde (NE_o) es el número estructural original de la estructura:

$$NE_{ef} = NE_o * (0,5 + 0,096 * VR^{0,358})$$

Ecuación 2.3 - Número estructural efectivo.

Este método no considera ningún trabajo de reposición realizado durante la vida del pavimento, por lo que muchas veces presenta imprecisiones en los resultados, por lo que se recomienda su uso solo para estudios a nivel de anteproyecto [28].

2.7.2 Recapado Asfálticos sobre Pavimentos Asfálticos

2.7.2.1 Factibilidad Técnica

Un recarpeteo asfáltico es un excelente método para prolongar la vida útil del camino asfáltico ya existente, no obstante, en ocasiones esta forma de rehabilitación de pavimento resulta poco efectiva, debido a las condiciones de la estructura existente que obliga a remover o reemplazar áreas muy extensas, dando como resultado una reducida o nula factibilidad técnica. La dirección de vialidad limita la aplicación de esta metodología a caminos asfálticos con las siguientes condiciones [28]:

- a) *“La cantidad de grietas por fatigamiento existentes es tan alta que prácticamente obliga remover parte substancial el pavimento”* [28].
- b) *“Presenta un ahuellamiento significativo que podría repetirse después del recarpeteo”* [28].
- c) *“Existe una base tratada que presenta señales de un serio deterioro que obliga a incluir reparaciones muy extensas para asegurar un soporte uniforme de la subrasante”* [28].
- d) *“Existe una base granular que debe reemplazarse pues evidencia contaminación e infiltración de suelos finos de la subrasante”* [28].
- e) *“La capa asfáltica presenta pérdidas de áridos por falta de adherencia entre árido y ligante”* [28].

2.7.2.2 Reparaciones Previas

Es primordial antes de la ejecución de un recapado reparar cierto tipo de grietas para prolongar la vida útil del pavimento, en la tabla 2.5 se indica los tipos y la reparación necesaria antes de instalar un recarpeteo.

Tabla 2.5 - Fallas y reparaciones previas. Fuente [28].

Tipo de Falla	Reparación Necesaria
Grietas por fatigamiento	Todas las áreas que presenten grietas por fatigamiento de alta severidad, deben repararse; también las áreas localizadas con grietas de severidad media, salvo que se instale una membrana especial para minimizar la reflexión de grietas. La reparación debe profundizarse en caso que se detecten suelos de baja capacidad soporte en la subrasante.
Grietas lineales	Toda grieta lineal abierta en más de 19 mm debe bachearse. Las grietas abiertas más de 6 mm se deben rellenar con una arena asfalto u otro producto adecuado para rellenar juntas. Si existen grietas transversales se deben tomar precauciones para minimizar su reflexión.
Ahuellamiento	Las huellas deben rellenarse con mezcla asfáltica o deben rebajarse mediante fresado, antes de colocar el recarpeteo. Si el ahuellamiento es severo, se debe determinar su origen y actuar en consecuencia.
Irregularidades superficiales	Se debe investigar la causa de toda depresión, levantamiento y corrugación y subsanar el problema; la mayoría de las veces se requiere remover y reemplazar el pavimento.

Para que la rehabilitación de los caminos tenga buenos resultados, es vital que el diseño considere la reparación y acondicionamiento previos.

2.7.2.3 Espesor del Recapado

Es esencial determinar un espesor adecuado, con el fin de poder brindar a la superestructura la capacidad de soporte adecuada, el espesor requerido para soportar el tránsito de diseño queda definido por la ecuación 2.4:

$$NE_{rec} = NE_f - NE_{ef}$$

Ecuación 2.4 - Número estructural del recarpeteo.

Donde:

NE_{rec} : Número estructural del recarpeteo.

NE_f : Número estructural necesario para soportar el tránsito futuro.

NE_{ef} : Número estructural efectivo del pavimento existente.

El “*Manual de Carretera, Volumen 3*” recomienda seguir la siguiente metodología para determinar el espesor del recapado de forma más precisa y confiable; a continuación, se señalan los numerales que pueden ser revisados en el manual antes mencionado:

a) “*Establecer las solicitaciones: Determinar las solicitaciones que se acumularán durante el periodo de vida útil proyectado (EE)*”. En caso de que se vaya a determinar el número estructural efectivo por el método de la vida útil remanente (procedimiento no recomendado para proyectos definitivos), establecer las solicitaciones acumuladas a la fecha del análisis (EE_p) [28].

b) “*Caracterizar la Subrasante: De preferencia determinar el M_r representativo de la subrasante mediante retroanálisis de mediciones con un deflectómetro de impacto, ajustándose a los criterios señalados en los numerales 3.603.205(3) y 3.605.104.*

Si resultara imposible hacer deflectometría, el M_r se puede determinar mediante una prospección de los suelos de la subrasante que se ajuste a lo señalado en el numeral 3.603.205.

Para el diseño se debe utilizar el promedio de la serie de valores detectados, ajustándose a los criterios señalados en 3.604.105 [28].

c) “*Determinar el Número Estructural Efectivo: De preferencia, determinar el NE_{ef} mediante retroanálisis de mediciones con un deflectómetro de impacto, ajustándose a los criterios señalados en los numerales 3.603.205(3) y 3.605.104.*

Si resultara imposible hacer deflectometría, el NE_{ef} se puede determinar preparando una monografía detallada de las características del deterioro que presenta la capa y utilizar los coeficientes estructurales que se detallan en la Tabla 3.603.203.A. del manual citado previamente. Al aplicar los valores indicados en la tabla se debe suponer que mediante trabajos previos al recarpeteo se repararon todas las áreas que presentan las anomalías que se describen en el cuadro del numeral 3.605.202 [28].

d) “*Determinar el Número Estructural Total Requerido: El número estructural requerido para las solicitaciones previas se determina como si se tratara de un pavimento nuevo, haciendo abstracción del pavimento existente. En los tres pasos previos se caracterizaron las solicitaciones y la subrasante, por lo que solo falta definir los índices de serviciabilidad inicial y final, que se deben ajustar a los señalado en el numeral 3.604.102 y el nivel de confianza, que se debe adoptar de acuerdo con el numeral 3.604.104, para contar con todos los*

antecedentes que permiten determinar el número estructural (NE_f) necesario para soportar el tránsito previsto.

El NE_f se determina tal como se señala para un pavimento nuevo y por lo tanto ajustándose a lo señalado en el Tópico 3.604.1 del Manual de Carreteras Volumen 3” [28].

- e) “Numero Estructural del Recarpeteo: De acuerdo con la ecuación. 3.605.203.1 presentada en Manual de Carreteras Volumen 3, el número estructural de recarpeteo es $NE_{rec} = NE_f - NE_{ef}$, es decir, la diferencia entre el valor calculado en el numeral d menos el determinado en el Numeral c. En cuanto a la estructuración, se recomienda, salvo que el pavimento existente se encuentra en muy buen estado (prácticamente sin deterioro), distribuir el NE_{rec} al menos en dos capas; la inferior debe ser una basa tratada con asfalto o si existe un agrietamiento significativo, una mezcla de graduación abierta” [28].

En la tabla 2.6 que se muestra a continuación, se presentan los coeficientes recomendados para pavimentos existentes.

Tabla 2.6 - Coeficiente estructural recomendado para pavimentos existentes. Fuente [28]

CAPA	CONDICION SUPERFICIAL	COEFICIENTE
Capa	Poco o casi nada de grietas de fatiga y/o grietas transversales ancho ≤ 6 mm	0,35 a 0,40
	<10% grietas de fatiga de severidad baja y/o < 5% grietas transversales ancho < 6 mm	0,35 a 0,40
	>10% grietas de fatiga de severidad baja y/o <10% grietas de fatiga de severidad media y/o >5-10% grietas transversales ancho > 6 mm	0,20 a 0,30
	> 10% grietas de fatiga de severidad media y/o < 10% grietas de fatiga de severidad alta y/o > 10% grietas transversales ancho > 6 mm	0,14 a 0,20
	> 10% grietas de fatiga de severidad alta y/o > 10% grietas transversales ancho > 19 mm	0,08 a 0,15
Base tratada	Poco o casi nada de grietas de fatiga y/o sólo grietas transversales de ancho ≤ 6 mm	0,20 a 0,35
	<10% grietas de fatiga de severidad baja y/o < 5% grietas transversales ancho < 6 mm	0,15 a 0,25
	>10% grietas de fatiga de severidad baja y/o <10% grietas de fatiga de severidad media y/o >5-10% grietas transversales ancho > 6 mm	0,15 a 0,20
	> 10% grietas de fatiga de severidad media y/o < 10% grietas de fatiga de severidad alta y/o > 10% grietas transversales ancho > 6 mm	0,10 a 0,20
	> 10% grietas de fatiga de severidad alta y/o > 10% grietas transversales ancho > 19 mm	0,08 a 0,15
Bases y subbases Granulares	Sin evidencias de surgencia de finos, degradación o contaminación con finos.	0,10 a 0,14
	Con alguna evidencia de surgencia de finos, degradación o contaminación con finos	0,00 a 0,10

2.7.2.4 Espesores de Recapado Usando Medidas de Deflexiones

Si no se cuenta con un deflectómetro de impacto, otra alternativa es utilizar una viga *Benkelman* u otro equipo similar para hacer medidas de deflexiones, de manera de lograr un buen diseño del recarpeteo, una vez obtenido los datos, el Instituto de Asfalto USA (*The Asphalt Institute, AI*) recomienda seguir el siguiente procedimiento de diseño [28]:

- a) “Normalizar las mediciones por temperatura utilizando los gráficos que entrega el propio método o medidas de corrección propias, derivadas de experiencias previas. También es necesario hacer ajustes estacionales cuando las mediciones no fueron realizadas durante el periodo más crítico del año; estos ajustes se hacen según criterios derivados de experiencias previas basadas en los resultados de programas de mención que se extienden todo el año (secciones de control)” [28].
- b) “Agrupar las deflexiones medidas según correspondan a zonas de cortes, zonas de terraplenes, tipo de drenajes, condiciones del pavimento, etc” [28].
- c) “La deflexión representativa de tramo homogéneo es igual al valor promedio de la serie más dos desviaciones estándar (corresponde, aproximadamente al percentil 97,7%)” [28].
- d) “El espesor del recarpeteo requerido se determina con la ecuación 2.5, que es función de la deflexión representativa y del tránsito expresado en ejes equivalentes (en millones)” [28].

$$h = \left[(1,216 * R^2 * T^{0,4876} - 1) * \frac{4430}{R^{2/3}} \right]^{0,5}$$

Ecuación 2.5 - Espesor de recarpeteo (mm).

Donde:

T: Tránsito (EE en millones).

R: Deflexión Representativa (mm).

h: Espesor de recarpeteo (mm).

Esta expresión corresponde a una simplificación de los ábacos y gráficos desarrollados por el AI, que arroja resultados aceptables, “diferencias menores que 5% para tránsitos superiores a 3 millones de EE y deflexiones superiores a 3,0 mm, para deflexiones menores que 3 mm las diferencias no superan el 0,2%”. Debe considerarse que, en general, cuando las deflexiones superan los 2,5 mm es preferible reconstruir completamente el pavimento” [28].

2.7.3 Recapado Asfáltico sobre Pavimentos de Hormigón

2.7.3.1 Factibilidad Técnica

En este caso el pavimento rígido se transforma en un pavimento mixto o semi-rígido instalando una capa flexible sobre el pavimento de hormigón existente, esta decisión se toma de acuerdo a los criterios de tiempo, recursos y económicos, entre otro. Esta alternativa es factible siempre y cuando, no sea necesario realizar reparaciones muy extensas. La dirección de vialidad hace mención de algunos casos en que no es factible emplear este tipo de recarpeteo [28].

- a) *“La cantidad de losas severamente agrietadas y la cantidad de juntas deterioradas es tan alta que prácticamente se deba remover parte substancial del pavimento”* [28].
- b) *“Existe un deterioro significativo debido a problemas de durabilidad del árido (este problema es de muy rara ocurrencia en el país)”* [28].
- c) *“Se presentan problemas para mantener el gálibo mínimo debajo de pasos inferiores. No se recomienda una reposición que considere una capa separadora granular tipo base, entre el pavimento de hormigón y la nueva capa asfáltica, salvo que el espesor de la base sea mayor que unos 400 mm. En tal caso, se debe aplicar el procedimiento descrito en 3.604.1 del Manual de carreteras Volumen 3 para pavimentos nuevos y no considerar aporte alguno al pavimento de hormigón existente”* [28].

2.7.3.2 Reparaciones Previas

Se debe realizar reparación antes de instalar un recarpeteo de asfalto, todas las reparaciones y cambios de losas deben presentar barras de amarre o barras de traspaso según corresponda, con el fin de conseguir un adecuado traspaso de cargas y lograr que la superestructura tenga un apropiado comportamiento. Los siguientes tipos de fallas, de acuerdo a la tabla 2.7, deben repararse [28]:

Tabla 2.7- Tipo de fallas y sus reparaciones. Fuente [28].

Tipo de Falla	Reparación Necesaria
Grietas que trabajan	Reparación en todo el espesor o cambio de la losa (las grietas de este tipo presentan bordes saltados, escalonamientos y otros signos de inestabilidad).
Juntas saltadas	Reparación en todo el espesor o en parte de él.
Reparaciones dañadas	Cualquier antigua reparación que presente signos de deterioro debe repararse mediante la técnica de reparación en todo el espesor.
Surgencia de finos	Se deben instalar drenes de pavimento
Losas hundidas	Nivelar con mezclas asfálticas o reconstruir la losa.

2.7.3.3 Espesor de Recapado

Para determinar el espesor de la nueva capa a instalar sobre la base de hormigón existente, se utiliza un método similar al proceso anterior (recarpeteo asfalto sobre asfalto) en donde se emplea la misma ecuación $NE_{rec} = NE_f - NE_{ef}$, para efectos de cálculo se considera la capa de hormigón existente como una capa asfáltica, se recomienda colocar una capa de mezcla de graduación abierta para controlar la reflexión de grietas, para determinar el espesor del recapado se deben seguir los siguientes paso:

- Establecer las Solicitaciones:** Se debe establecer las solicitaciones (EE) acumulables durante el periodo de vida útil proyectado y utilizar los factores equivalentes que correspondan [28].
- Caracterizar la Subrasante:** Idealmente por medio de deflectometría o por prospección de los suelos, se debe establecer el módulo resiliente M_r de la subrasante [28].
- Transformar el Pavimento de Hormigón a un Número Estructural Efectivo Equivalente:** como el hormigón y el asfalto tienen propiedades estructurales distintas se debe hacer una relación para considerar en el diseño al hormigón con una capa asfáltica, se recomienda hacer una monografía detallada, además utilizar los factores de conversión o espesor que se entregan en la tabla (8), estos factores multiplicados por el espesor correspondiente y por 0,43 (coeficiente estructural de concreto asfáltico), entregarán el número estructural efectivo equivalente, el cual utilizaremos en el diseño del recarpeteo. En la tabla 2.8 se muestran los factores de conversión para transformar el espesor del pavimento existente a espesor efectivo [28].

Tabla 2.8- Factores de conversión espesor existente a espesor efectivo. Fuente [28].

Tipo	Descripción	Coefficiente
I	a) Subbase o Base Granulares (CBR \geq 20%) Si IP \leq 6 Si IP $>$ 6	0,3 0,2
	b) GTC o Suelo Cemento (IP $<$ 10) usados como bases o subbases	0,2 a 0,3
II	a) Base Granular; material granular no plástico de alta calidad.	0,4 a 0,5
	b) Mezclas Asfálticas; agrietadas, fragmentadas a lo largo de las grietas, apreciable Ahuellamiento, con alguna evidencia de inestabilidad.	0,3 a 0,5
	c) Pavimento de hormigón; quebrado en trozos (máxima dimensión = 600 mm), antes de colocar una capa encima: Si existe subbase Si losa se apoya en subrasante	0,4 a 0,5 0,3 a 0,4
	d) Bases de Suelo-Cemento; muy agrietadas, evidenciado por las reflexiones de grietas, Pumping o inestabilidad.	0,3 a 0,5
III	a) Capas de rodadura y bases asfálticas; muy agrietadas, sin que estén fragmentadas, Exhiben alguna deformación pero son esencialmente estables.	0,5 a 0,7
	b) Pavimento de hormigón; muy agrietado y escalonado, que no pueden inyectarse para estabilizarlos en forma efectiva. Con fragmentos de losa (de 1 a 4 m ²), bien asentados en la subrasante con rodillos neumáticos pesados.	0,5 a 0,7
	c) Bases de Suelo-Cemento; con pequeñas grietas evidenciadas por la reflexión, bajo Superficies estables.	0,5 a 0,7
IV	a) Capa de Rodadura tipo Concreto Asfáltico; con grietas finas, deformaciones leves, pero estable.	0,7 a 0,9
	b) Mezclas asfaltos líquido; estables, sin grietas, sin exudación, deformaciones leves.	
	c) Bases asfálticas.	
	d) Pavimento de hormigón; estable por inyección de algunas grietas, trozos mayores a 1 m ²	
V	a) Concreto asfáltico; incluyendo capa intermedia, sin grietas y con deformaciones leves	0,9 a 1,0
	b) Pavimento de hormigón; estable, y no agrietado.	
	c) Base de pavimento de hormigón; bajo superficie asfáltica estable, sin pumping, poca reflexión de grietas.	

Otro método para determinar el número estructural es haciendo deflexión con una Viga *Benkelman* y utilizando la ecuación 2.6:

$$D_{vb} = D_0 - \frac{6,264}{E_s}$$

Ecuación 2.6 - Deflexión de pavimento medido con Viga Benkelman (mm).

Donde:

D_{vb} : Deflexión de pavimento medido con Viga Benkelman (mm).

D_0 : Deflexión absoluta del pavimento o deflexión FWD.

E_s : Módulo del suelo de subrasante (Mpa).

Utilizando la ecuación 2.7 se podrá determinar el número estructural efectivo del pavimento existente:

$$NE_{ef} = 10,789 * D_{vb} - 0,421$$

Ecuación 2.7 - Número estructural efectivo del pavimento existente.

El método a utilizar dependerá de los instrumentos e información con las que se cuentes y de preferencia en ingeniería.

- d) *Determinar el Numero Estructural Total Requerido:* El NE_f se debe determinar como si fuera un pavimento nuevo, haciendo abstracción del pavimento existente, tal cual como lo dispone el "Manual de Carreteras, Volumen 3" (3.604.1), se deben definir los índices de serviciabilidad inicial y final que se ajuste a lo señalado y adoptar el nivel de confianza adecuado [28].
- e) *Numero Estructural del Recapado:* El NE_{rec} se determina con la expresión antes definida $NE_{rec} = NE_f - NE_{ef}$, la diferencia entre los valores determinados en el punto c y d [28].

Existen otros tipos de recapados que solo se mencionaran para conocimiento general, pero no son de relevancia para la presente investigación, estos son:

- a) Recapado de un pavimento asfáltico con pavimento de hormigón.
- b) Recapado de pavimento de hormigón con pavimento de hormigón no adherido.

Capítulo 3: Metodología

3.1 Fases del Trabajo de Título

En la primera etapa de trabajo se recopilará información relacionada con los siguientes temas a investigar:

- a) Métodos y técnicas para el diseño y construcción de vías y recapados asfálticos, particularmente de pavimentos flexibles y aquellas que utilizan mezclas asfálticas en caliente mejoradas con la adición de fibras sintéticas.
- b) Tipos de deterioro de caminos asfálticos, específicamente grietas por reflexión, grietas ascendentes producidas por solicitaciones térmicas o de tránsito.
- c) Selección de métodos de ensayos, recopilación de datos y nuevas especificaciones, aludidas a verificar el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente para diseño de recapados asfálticos, especialmente ensayos relacionados con la evaluación de desempeño, fisuración y susceptibilidad a la humedad, entre otros.

Basándose en la documentación y análisis de la información recopilada se desarrolla la siguiente metodología con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados. En el presente documento se verifica el desempeño de las mezclas asfálticas en caliente, específicamente el aporte al retardo del arribo de fisuras existentes, incorporando fibras sintéticas patentadas con el nombre de FORTA-FI en la rehabilitación de pavimentos.

Se presenta de forma ordenada las etapas relativas a los métodos y procedimientos de trabajo de investigación y cumplimiento de los objetivos. La investigación se desarrolla en 5 fases; una fase exploratoria y formulación de una propuesta, una segunda fase de formulación y procedimientos de la investigación, una tercera fase, un programa experimental y análisis cuantitativo, una cuarta fase, un análisis empírico cuantitativo y comparativo de los resultados, y una quinta fase correspondiente a los comentarios conclusiones y recomendaciones.

Fase I:

Etapla exploratoria y formulación de propuesta: En esta fase se trabaja en el planteamiento del problema y en una propuesta de investigación además se definen los objetivos de ésta. Se realiza una exploración bibliográfica frente a temas como tipos y componentes de un pavimento, mezclas asfálticas, fallas más comunes en pavimentos asfálticos, utilización de polímeros con el fin de modificar las propiedades mecánicas de la carpeta de rodado, y métodos de rehabilitación de camino,

Fase II:

Etapla de formulación y procedimiento de la investigación: Se constatan los antecedentes relevantes del tema de investigación, particularmente la utilización de mezclas asfálticas modificadas con polímeros y fibras, con especial énfasis en las propiedades mecánicas que se podrían aprovechar de la fibra sintética FORTA-FI, para mitigar los efectos de fisuras ascendentes en recapados asfálticos. También se identifica las técnicas de evaluación de fisuras y deterioro más comunes en este tipo de solución de conservación de carpetas de rodado.

Fase III:

Programa experimental: Se presentan los ensayos para evaluar las propiedades de mezclas asfálticas según lo especificado por la normativa chilena vigente y normas extranjeras validadas. Evaluando el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente para diseño de recapados asfálticos, especialmente ensayos relacionados con la evaluación de desempeño, fisuración, módulo y susceptibilidad a la humedad. La incorporación de la fibra se realizará según proporción en base al peso del agregado mineral, básicamente se definen 4 tipos de probetas, se incorpora la fibra a la mezcla según el proceso de dispersión recomendado por la Universidad Estatal de Arizona en su Centro Nacional de Excelencia para Innovación Inteligente y la empresa FORTA CORPORATION.

Fase IV.

Análisis y resultados: De las experiencias en laboratorio y una vez terminado los ensayos se revisan los resultados y se analiza cada uno de ellos, mediante la elaboración de gráficos asociando las variables en estudio, se hace una evolución cuantitativa y comparativa del comportamiento de las distintas dosificaciones definidas.

Fase V.

Conclusiones y recomendaciones: Por último, se muestran las conclusiones finales, sugerencias y recomendaciones que permiten responder a los objetivos planteados. Además del trabajo en laboratorio se tomarán muestras de recapados, núcleos cilíndricos (Testigos) de canchas de prueba, para evaluar el comportamiento en obra de forma más real

3.2 Procedimiento de Metodología de Trabajo

A continuación, en la figura 3.1 se presenta el diagrama de flujo de la metodología de trabajo.

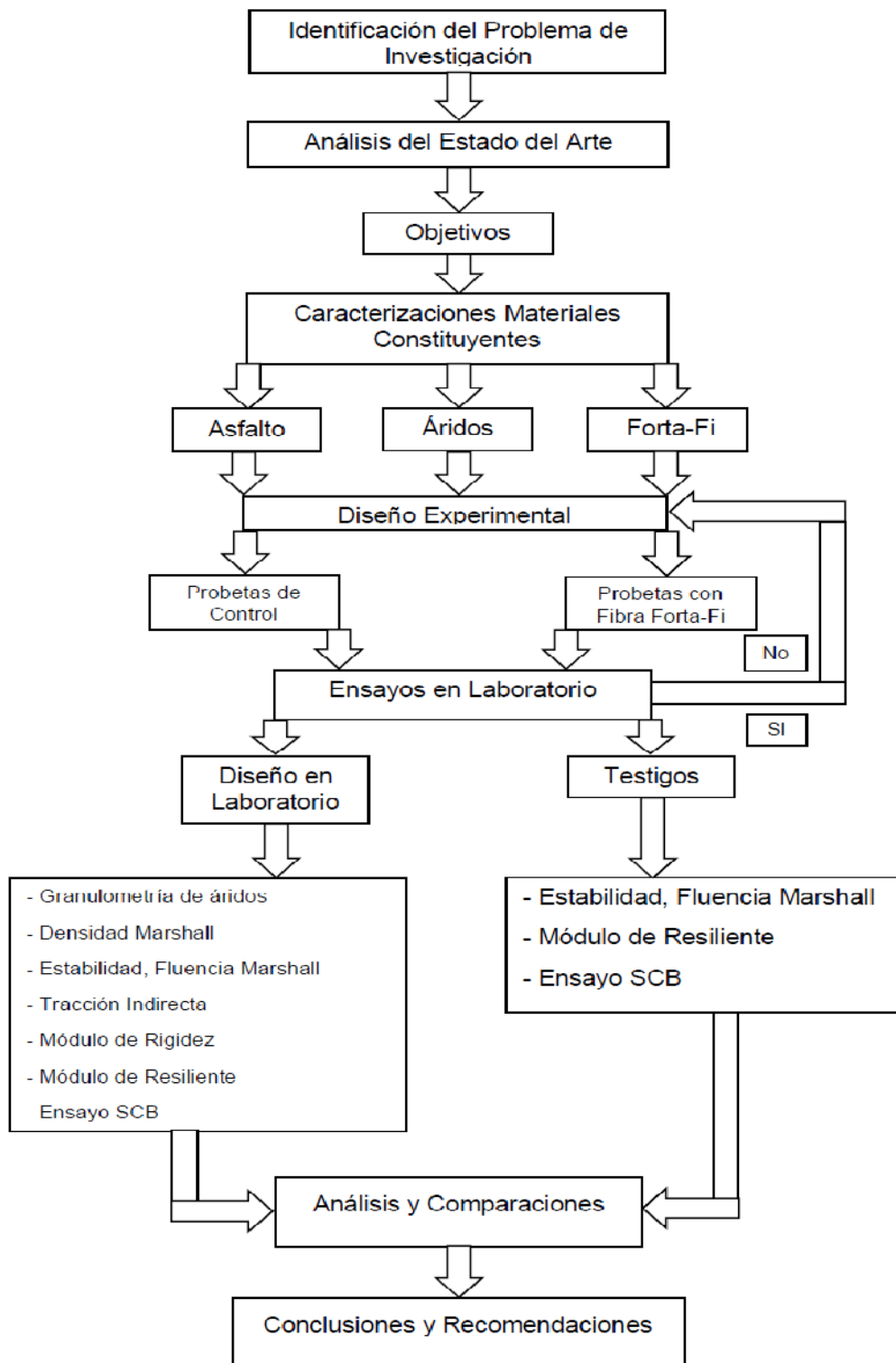


Figura 17 - Metodología de la Investigación

Se crea un plan experimental de ensayos, comparaciones y mediciones en laboratorio, para evaluar la influencia en las propiedades mecánicas, volumétricas, desempeño y fisuración entre otros, para las mezclas bituminosas convencionales de la Región de Valparaíso principalmente las utilizadas en la empresa Bitumix con áridos del río Aconcagua y la adición de fibra FORTA-FI. El Plan se resume a continuación.

El plan consiste básicamente en diseñar en laboratorio 4 tipos de probetas, un tipo sin fibra FORTA-FI, a la cual llamaremos probeta control y otras 3 con fibra FORTA-FI, una contiene la dosificación recomendada por FORTA CORPORATION de 500 gr por tonelada 0,05%, y otras dos son propuestas para evaluación; una de 250 gr por tonelada 0,025%, y otra 750 gr por tonelada 0,075%, la dosificación de fibras se calcula en base al peso del agregado, los 4 tipos de briquetas serán elaborados con los mismos materiales, es decir, idéntica mezcla bituminosa y áridos de la misma procedencia mencionados anteriormente. Las probetas serán sometidas a idénticos tipos de ensayos y se evaluarán bajo las mismas condiciones con el fin de comparar los resultados de cada experiencia. En la tabla 3.1 se muestra el plan experimental.

Tabla 9- Plan Experimental.

Ensayos	Probetas de Calibración	Probeta Control	Probetas con FORTA-FI			Total de Probetas por Ensayo
		Sin FORTA-FI	250 gr	500 gr	750 gr	
Densidad Marshall	1	3	3	3	3	13
Estabilidad y Fluencia Marshall	1	3	3	3	3	13
Tracción Indirecta	1	6	6	6	6	25
Módulo de Rigidez	1	4	4	4	4	17
Módulo Resiliente (Mr)	1	3	3	3	3	13
Curva Semi-Circular (SCB) a Temperatura Intermedia	4	12	12	12	12	52
Numero de Total de Probetas	9	31	31	31	31	133

Para realizar las distintas experiencias mencionadas en la tabla 3.1, básicamente se elaboran dos tipos de probetas, para cumplir con los requisitos exigidos por las normativas vigentes y utilizando los recursos disponibles por el laboratorio regional, un tipo de probetas de 1100 gr elaborada a 75 golpes según el método Marshall de acuerdo a M.C.8.302.40, y un segundo tipo de briquetas de 4500 gr confeccionadas por el compactador giratorio método Superpave. Debido a la pandemia mundial COVID-19, el Gobierno de Chile junto con el Ministerio de Salud, ordenó la suspensión y cierre de ciertos establecimientos, tales como colegios y universidades, junto con ello el Ministerio de Obras Públicas ordenó la suspensión de algunas labores en el Laboratorio Nacional y regional, impidiendo el cumplimiento del 100% del proceso experimental diseñado, por esto se omitió la elaboración de probetas de 150 mm de diámetros, en el compactador giratorio que se encuentra en el Laboratorio Nacional de Vialidad.

Para evaluar el comportamiento del fenómeno de floración de grietas ascendente, será empleado un ensayo de fisuración llamado *The Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures*, el plan experimental del ensayo de fisuración se encuentra en tabla 3.2, este ensayo consiste básicamente en una muestra semicircular a la cual se le aplica una carga monotónicamente hasta alcanzar la falla por fractura, la prueba se repite para múltiples profundidades de muesca, para calcular la energía de deformación crítica tasa de liberación (J_c en kJ/m^2) (*parámetro que se utiliza para evaluar la resistencia de las mezclas asfálticas al agrietamiento, es la fuerza resistente al agrietamiento*). Los valores altos de J_c nos indicarían un mejor desempeño de la mezcla, y una mayor resistencia a la fractura, los valores recomendados de J_c para asegurar una resistencia adecuada de la mezcla a la fractura varían de 0,5 a 0,60 kJ/m^2 , este ensayo será realizados para probetas con y sin fibra.

Tabla 10- Plan Experimental ensayo de fisuración.

Curva Semi-Circular (SCB) a Temperatura Intermedia						
Profundidad de Muesca	Testidos de Calibración	Sin FORTA-FI	250 gr	500 gr	750 gr	Total por Muesca
25 mm	1	4	4	4	4	17
32 mm	1	4	4	4	4	17
38 mm	1	4	4	4	4	17
Total de Testigos por Dosificación	4	12	12	12	12	52

Ya concluidos los ensayos en laboratorio o en paralelo a estos, y en base a los periodos de ejecución de un tramo de prueba, en caso de que alguna obra en ejecución lo permita, se extraerán núcleos (testigos) de la obra, y se compararan los testigos con y sin fibra, evaluando los beneficios de FORTA-FI ante la aparición de grietas reflejadas en núcleos por medio del ensayo de fisuración (SCB), los ensayos de desempeño tradicionales como lo son el ensayo de Estabilidad y Fluencia Marshall, y evaluar el grado de elasticidad de la mezcla mediante el ensayo de Módulo Resiliente. Este punto de evaluación de testigos no es obligatorio para el presente proyecto de título, pero podría ser un indicador relevante para estimar si la fibra aporta o no beneficios a los recapados asfálticos para hacer frente a la reflexión de grietas. En la tabla 3.3 se muestran el plan experimental para extracción de testigos.

Tabla 11- Plan de evaluación de testigos.

Ensayos	Probetas de Calibración	Probeta Control	Probetas con FORTA-FI			Total de testigos para Ensayos
		Sin FORTA-FI	250 gr	500 gr	750 gr	
Estabilidad y Fluencia Marshall	1	3	3	3	3	13
Módulo Resiliente (Mr)	1	3	3	3	3	13
Curva Semi-Circular (SCB) a Temperatura Intermedia	4	12	12	12	12	52
Numero de Total de Probetas	6	18	18	18	18	78

El plan mencionado en la tabla 3.3 quedará sujeto a modificación, dependiendo de la disponibilidad de la fibra y la voluntad de aplicar las dosificaciones propuestas en esta investigación por parte de la empresa a cargo, como mínimo se recomienda evaluar el comportamiento de la probeta control versus la dosificación recomendada por el fabricante, indicada en color amarillo.

3.3 Procedimiento de Diseño de la Mezcla Asfáltica

3.3.1 Granulometría

De los áridos proporcionados por la empresa Bitumix S.A. planta Concón, se procede a analizar las características del conjunto de las partículas pétreas, con el fin de determinar si cumplen con las especificaciones de diseño. Los agregados deben ser limpios, tenaces y durables y lo más importante deben tener una granulometría (*indica la distribución de los diferentes tamaños de las partículas*) de acuerdo a la especificación. Se realiza la granulometría de los áridos en estudio de acuerdo a M.C.8.202.1, M.C.8.202.2, M.C.8.202.3, M.C.8.202.4 y M.C.8.202.6. La granulometría de los áridos se compara con la de diseño de la constructora Bitumix S.A. la cual es del tipo semi-densa y corresponde a una banda IV-A-12. Los procedimientos completos para la granulometría se encuentran en el Manual de carreteras vol. 8.

3.3.2 Dispersión de FORTA-FI

Para agregar la fibra a la mezcla en laboratorio es necesario pre-dispersar la fibra, método sugerido por la Universidad Estatal de Arizona y la empresa FORTA CORPORATION y que se utilizará en la Unidad de Gestión de Calidad y Laboratorio de la Región de Valparaíso del M.O.P., para simular el trabajo de dispersión normal en una planta tipos *batch* (discontinua) o en una de tipo Tambor (continua) a cualquier velocidad, con el fin de lograr que la fibra en la mezcla para elaborar las probetas esté distribuida uniforme y completamente, de forma que la briqueta sea realmente representativa de un trabajo de recapado con la adición de FORTA-FI. Algunos pasos en el proceso recomendado fueron adaptados a los recursos del Laboratorio regional.

3.3.3 Determinación de Densidad

Una vez elaboradas las probetas, según el método Marshall para determinar la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas asfálticas M.C.8.302.40, y antes de ensayar, se debe determinar la densidad Marshall, la densidad de la mezcla compactada se define como la masa de un volumen específico de mezcla. La densidad que se obtiene de las probetas de Laboratorio se considera de referencia, y es usada para determinar el porcentaje de compactación en terreno con respecto a la obtenida en éste. La densidad en laboratorio debería ser inferior a la densidad lograda en obra, producto del proceso de envejecimiento y mayor energía de compactación utilizada. Se determina la densidad Marshall según M.C.8.302.38 (B) método para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas, la densidad será el promedio de la medición de las tres briquetas. Se debe descartar cualquier probeta que esté 20 kg/m^3 sobre el promedio, además si el porcentaje de absorción (A_{ab}) de alguna probeta es mayor que 2 se debe emplear el M.C.8.302.38(A).

3.3.4 Propiedades Marshall: Estabilidad y Fluencia

Una vez construidas y acondicionadas las probetas asfálticas, se procede a realizar el ensayo en la prensa Marshall, como la que se presenta en la figura 3.2, a probetas de 102 mm de diámetro y 63 mm de altura compactadas a 75 golpes, según el M.C.8.302.40 y el M.C.8.302.47. La estabilidad Marshall corresponde a la carga máxima en Newton (N) necesaria para producir la falla a una temperatura y velocidad de carga definidas por norma, el mínimo valor de Estabilidad aceptado es de 9.000 (N). La fluidez es la deformación que se produce en la carga máxima, se mide en un cuarto de milímetro 0,25 mm, el rango aceptable según el *Manual de Carreteras* esta entre 8 a 16 (0,25mm), tabla 3.4. La estabilidad y fluencia medidas en laboratorio son sólo un indicador ya que estas propiedades en obra deberían tener valores superiores debido al envejecimiento normal de la mezcla.

Tabla 3.4- Criterios de diseño Marshall. Fuente [12].

Tipo de Mezcla	Estabilidad	Fluencia (0,25)		Huecos en la Mezcla (%)	
	mín	mín	máx	mín	máx
Rodadura	9000	8	16	4,0	6,0
Intermedia	8000	8	16	3,0	8,0
Base Gruesa	6000	8	16	5,0	10,0
Superficie Fina	4000	8	16	3,0	8,0



Figura 18 - Maquina Marshall Laboratorio de Vialidad.

3.3.5 Ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta

El ensayo ITS M.C.5.413.205 (2) se usa para evaluar la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la humedad, se elabora un grupo de 6 probetas por medios del método M.C.8.302.40 y se acondicionan para ser ensayadas tanto en condición seca como saturada, antes del ensayo se determina la densidad según el método M.C.8.302.38(C), se descarta cualquier probeta cuya densidad tenga una diferencia de 50 kg/m³ del promedio de las densidades [29].

Una vez determinada la carga máxima, se calcula el ITS según la ecuación 3.1:

$$ITS = \frac{2*P}{L*D*\pi} * 10000 \text{ (Kpa)}$$

Ecuación 8 - Resistencia a la tensión indirecta, en Kpa.

Donde:

ITS= Resistencia a la tensión indirecta, en Kpa.

P= Carga máxima aplicada, en KN.

L= Altura promedio de la probeta, en cm.

D= Diámetro promedio de la probeta, en cm.

Una vez realizado los ensayos de ITS en estado seco y saturado para probetas de control y con FORTA-FI se calcula el índice de resistencia conservada (IRS) o resistencia a la tracción retenida (TSR) para evaluar la susceptibilidad al agua de la mezcla, figura 3.2. Este parámetro se obtiene relacionando el ITS en ambos estados a través de la ecuación 3.2. El valor de TSR es aceptado sólo si es mayor a 80%.

El procedimiento completo para el ensayo ITS se encuentra en el M.C.5.413.205.

$$IRS = \frac{ITS \text{ SATURADO}}{ITS \text{ SECO}} * 100$$

Ecuación 9 - Índice de Resistencia Conservada.

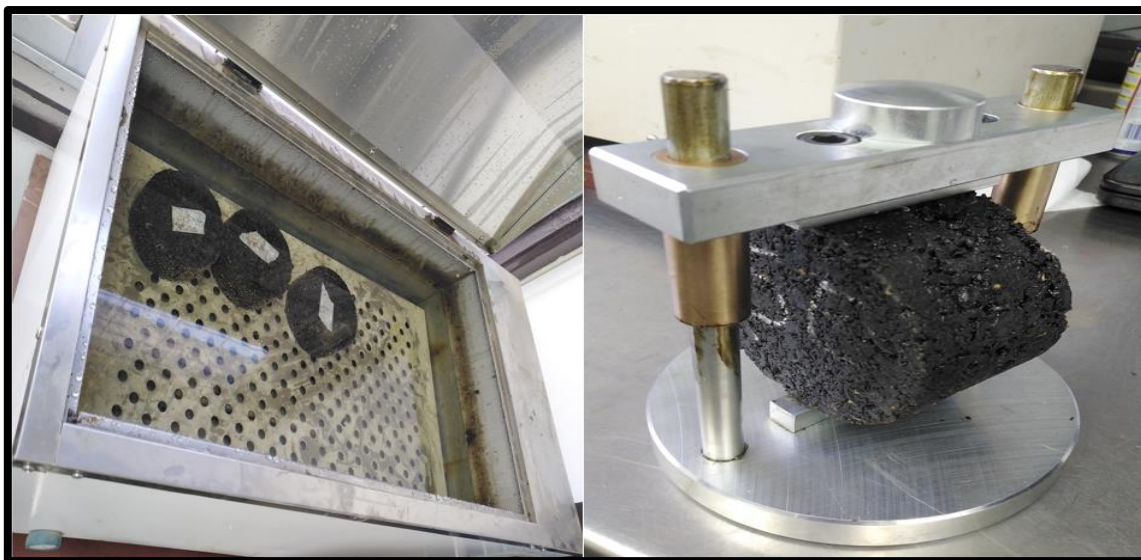


Figura 19- Baño de agua y mordaza Lottman.

3.3.6 Módulo de Rigidez

Se plantea la medición de la rigidez de las mezclas asfálticas. La rigidez es una de las propiedades de las mezclas que define la tolerancia del pavimento ante las deformaciones inducidas, la rigidez de una mezcla queda definida por un parámetro llamado Módulo de Rigidez, este se medirá según el método definido por la norma europea (UNE-EN 12697-26:2012. ANEXO C) Módulo de Rigidez en mezclas elaboradas en laboratorio.

El Módulo de rigidez corresponde al valor absoluto del módulo complejo, o el valor del módulo secante, es decir, a la relación entre el esfuerzo y la deformación en un tiempo de carga (t), para MAC sometidas a una carga con una tasa de deformación controlada. De esta forma, para bajas temperaturas (rango elástico), el módulo complejo es igual al Módulo de Rigidez.

Se debe tener presente las siguientes consideraciones:

1.- Hay determinados parámetros que influyen directamente en el resultado del ensayo, como es la temperatura de ensayo, acondicionamiento de la mezcla y de las briquetas o la edad de las mismas [30].

2.- Los valores de módulo de rigidez de muestras de planta industrial pueden variar significativamente con los obtenidos en diseño de MAC en laboratorio [30].

3.- Los valores de módulo de rigidez pueden ser distintos a los analizados inicialmente en laboratorio si los vacíos de la mezcla difieren significativamente entre análisis [30].

4.- Los valores de módulo de rigidez varían en función del tiempo debido, principalmente, al envejecimiento de la mezcla, la densificación de la mezcla por efecto de las cargas del tránsito vehicular y la oxidación normal del ligante que compone la mezcla [30].

El módulo de rigidez se determina a partir de la ecuación 3.3:

$$E = \frac{F*(v+0,27)}{z*h}$$

Ecuación 10 - Módulo de Rigidez (Mpa).

Donde:

E = Módulo de rigidez (Mpa).

F = Valor máximo de la carga vertical aplicada (N).

z = Amplitud de la deformación horizontal (mm).

h = Espesor medio de la probeta (mm).

v = Coeficiente de Poisson (si no se determina suponer 0,35 para todas las temperaturas).

El análisis de la variación del módulo de rigidez en el tiempo de mezclas MAC (con y sin fibra) entregará datos importantes para el diseño, mantención, rehabilitación y mitigación de grietas reflejadas en recapados de camino, ayudando en la toma de decisiones para definir la aplicabilidad de FORTA-FI al mercado nacional, y en la elección de las mezclas asfálticas para la actividad de recapado y el retardo de la aparición por reflejo de la fisuras existentes, además evaluar una posible disminución de espesor de la carpeta de rodado.

3.3.7 Módulo Resiliente Diametral para Mezclas Asfálticas

Se propone la medición del módulo resiliente según la norma ASTM D-4123, este ensayo se realiza para determinar el grado de elasticidad que posee un material (módulo elástico de una mezcla asfáltica). Los valores del módulo resiliente pueden emplearse tanto para el diseño de la mezcla asfáltica, como para el diseño del espesor de la capa de pavimento asfáltico.

La resiliencia es la capacidad de un material de recobrar su forma original después de haber sido sometido a una fuerza deformante. Aquellos materiales que no recuperan su forma se denominan viscosos, y los que recuperan su forma se denominan elásticos, el cemento asfáltico es considerado un material viscoelástico, a altas temperaturas se comporta como un material viscoso, a temperaturas intermedias se comporta como un material elástico y a medida que es sometido a temperaturas extremadamente bajas se transforma en un material frágil.

Para la determinación del módulo resiliente diametral de mezclas bituminosas se aplica un pulso de cargas de compresión sobre la briqueta. La carga se aplica verticalmente en el plano diametral vertical de la probeta. Se mide la deformación horizontal resultante y asumiendo un determinado coeficiente de Poisson, se determina el módulo resiliente correspondiente empleando un equipo cíclico de tracción indirecta.

El módulo resiliente de elasticidad e (en MPa) y el coeficiente de Poisson se calculan considerando lo definido en las ecuaciones 3.4 a 3.7:

$$e_{RI} = \frac{P(v_{RI}+0,27)}{t*\Delta H_I}$$

Ecuación 11- Módulo Resiliente de elasticidad instantáneo (Mpa).

$$v_{RI} = \frac{3,59*\Delta H_I}{\Delta V_I} - 0,27$$

Ecuación 12 - Coeficiente de Poisson instantáneo.

$$e_{RT} = \frac{P(v_{RT}+0,27)}{t*\Delta H_T}$$

Ecuación 13 - Módulo Resiliente de elasticidad total (Mpa).

$$v_{RT} = \frac{3,59 * \Delta H_T}{\Delta V_T} - 0,27$$

Ecuación 14 - Coeficiente de Poisson total.

Donde:

e_{RI} : Módulo resiliente de elasticidad instantáneo (Mpa).
 e_{RT} : Módulo resiliente de elasticidad total (Mpa).
 ν_{RI} : coeficiente de Poisson instantáneo.
 ν_{RT} : coeficiente de Poisson total.
 P : carga cíclica (N).
 t : espesor de la probeta (mm).
 ΔH_I : deformación horizontal instantánea recuperable (mm).
 ΔV_I : deformación vertical instantánea recuperable (mm).
 ΔH_T : deformación horizontal total recuperable (mm).
 ΔV_T : deformación vertical total recuperable (mm).

Si se asume un valor determinado del coeficiente de Poisson, no es necesario medir las deformaciones verticales. Para mezclas asfálticas a una temperatura de 77°F (25°C), se puede tomar un valor de $\nu=0,35$. La resistencia a la tracción S_T se calcula mediante la ecuación 3.8:

$$S_T = \frac{2 * P_{\text{últ}}}{\pi * t * D}$$

Ecuación 15 - Resistencia a la tracción S_T .

Donde:

$P_{\text{últ}}$: carga aplicada que lleva la probeta a la falla (Kpa).
 t : espesor de la probeta (mm).
 D : diámetro de la probeta (mm).

Existen ciertos parámetros que influyen directamente en el resultado del ensayo, como es la temperatura de ensayo, acondicionamiento y envejecimiento de la mezcla, equipos de medición y tipo de carga. Es por esto que los valores del módulo de muestras de planta industrial pueden variar significativamente con los obtenidos en diseño de HMA en laboratorio. El procedimiento completo para el ensayo Módulo Resiliente Diametral para Mezclas Asfálticas se encuentra en el documento (Norma ASTM D-4123).

3.3.8 Prueba de Flexión Semicircular (SCB) a Temperatura Intermedia

La prueba *The Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures* (prueba de flexión semicircular) es un ensayo rápido y simple que se puede realizar a probetas de laboratorio o testigos de un pavimento, esta experiencia proporciona información decisiva sobre las características del material necesarias para el diseño del pavimento, ya que la prueba es una herramienta simple para obtener información sobre el módulo, las características de tracción y la propagación de grietas de las mezclas de asfalto, este ensayo de fisuración es útil para evaluar el comportamiento de la mezcla y predecir el rendimiento del agrietamiento de los pavimentos de asfalto.

La prueba se desarrolla según la norma D8044-16 de la ASTM, una muestra elaborada en el compactador giratorio de diámetro 150 mm y altura 120 mm es acondicionada según la norma, en un media circunferencia con una muesca de profundidad 25 mm, 32 mm, y 38 mm en su eje, se deberá preparar cuatro especímenes por muesca, ver figura 3.4, luego se aplica un carga monotónica hasta alcanzar la falla por fractura, se calcula la tasa de liberación de energía de deformación crítica (J_c en kJ/m^2), valores altos de J_c son deseables para mezclas resistente a la fractura, los valor recomendados de J_c para asegurar una resistencia adecuada de la mezcla a la fractura varían de 0,5 a 0,60 kJ/m^2 . El procedimiento completo para la prueba se encuentra en el documento D8044-16 de ASTM.

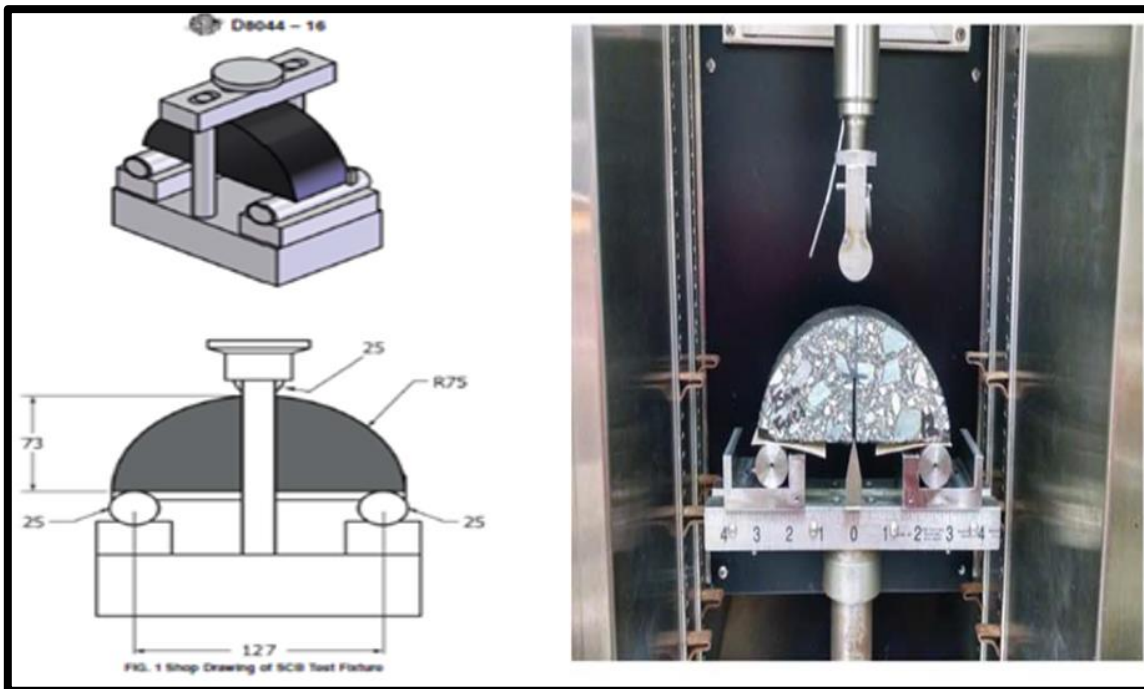


Figura 20 - Prueba de flexión semicircular (SCB) a temperatura intermedia. Fuente [19]

3.3.8.1 Método Superpave (Compactador Giratorio)

La elaboración de las briquetas necesarias para realizar la prueba (SCB) requiere un diámetro de 150 mm y una altura de 120 mm, lo que hace necesario la utilización del Compactador Giratorio equipo utilizado por el método Superpave (*Superior Performance Asphalt Pavement*). Este equipo amasa la mezcla en vez de golpearla, el grado de compactación que establece Superpave, tiene relación con el nivel de tránsito que solicita el diseño. Además, el método Superpave considera un proceso de envejecimiento artificial de la mezcla lo que provoca una absorción de asfalto, traducándose en un aumento en el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada. Este método fue incorporado a las especificaciones del Manual de Carreteras M.C.8.301.8. El compactador giratorio disponible se encuentra en el Laboratorio Nacional de Vialidad ubicado en la Región Metropolitana, el cual se encuentra cerrado por decisión del Ministerio de Obras Públicas, motivo por el cual no se pudo utilizar y por ende no se elaboraron las briquetas de 150 mm; estas briquetas serán reemplazadas por testigos de obra con el diámetro requerido.

3.3.9 Método de Extracción de Testigos

Un testigo o núcleo cilíndrico corresponde a un parte del pavimento terminado, extraída mediante un proceso de aserrado con un instrumento diamantado con el fin de verificar distintas propiedades de cada capa, un testigo puede tener diferentes dimensiones y su principal objetivo es servir como muestra para asegurar la calidad de una obra.

Los núcleos asfálticos están destinados principalmente, a verificar el espesor, contenido de asfalto y la densidad de una capa específica del pavimento, o el cumplimiento de cualquier otra propiedad de diseño. Para el presente estudio de mezclas asfálticas modificadas con FORTA-FI se utilizarán testigos, extraídos de pavimentos ya terminados y en uso, con el fin de realizar el ensayo a fisuración SCB, se tomarán testigos con y sin fibra de diferentes puntos (kilometrajes) del pavimento asfáltico. Se extraerán cilindros de 150 mm (6 pulg), los cuales deberán ser acondicionados en el laboratorio para su correspondiente ensayo. El procedimiento completo para la extracción de testigos se encuentra en el Manual de Carreteras vol. 8. número 8502.3.

Capítulo 4: Experiencia en Laboratorio

En este capítulo se presentan los resultados y análisis del comportamiento de las distintas dosificaciones propuestas de la fibra sintética FORTA-FI, investigación realizada en la Unidad de Gestión de Calidad y Laboratorio de la Región de Valparaíso del M.O.P.

4.1 Caracterización de los Materiales Constituyentes

4.1.1 Caracterización Cemento Asfáltico

El cemento asfáltico usado en la experiencia en laboratorio corresponde a un CA-24 proveniente de la empresa Probisa utilizado por Bitumix S.A. en sus mezclas tradicionales, cumpliendo las especificaciones que señala el “Manual de Carretera, Volumen 8”. El contenido óptimo según el diseño utilizado en planta es de un 4,9% referido al agregado, en la tabla 4.1 se especifica algunos antecedentes del diseño, se utilizará el diseño tradicional de las mezclas de la Constructora Bitumix S.A. por lo que no se modifica el óptimo porcentaje de asfalto que la empresa utiliza en su mezcla, ya que no es objetivo de esta investigación modificar el porcentaje óptimo del bitumen.

Tabla 12 - Antecedentes de Diseño del Concreto Asfáltico.

Antecedentes de Diseño del Concreto Asfáltico	
Cemento Asfáltico	CA-24
Procedencia	Probisa
Densidad (<i>batch</i> 1769-1)	1,028 (gr/m ³)
Temperatura mezclado en laboratorio	151°C +/- 3°C
Temperatura de compactación en laboratorio	142°C +/- 3°C
% optimo referido al agregado	4,9% +/-0,3%
Rango de temperatura mezcla en planta	(145 - 170)°C
Rango de temperatura compactación en obra	(120 - 160)°C

En la tabla 4.2 se muestra las especificaciones para cemento asfáltico, de acuerdo a su grado de viscosidad, según M.C.8.301.1.

Tabla 13 - Especificaciones para los Cementos Asfálticos según su grado de viscosidad. Fuente [23].

Ensayes	Grado de Viscosidad
	CA-24
Viscosidad absoluta a 60°C, 300 mm Hg, poises	mín 2400
penetración, 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	mín 40
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	mín 100
Ensaye de la Mancha (% xilol)	máx 30%
Solubilidad en tricloroetileno, %	mín 99
Punto de Inflamación, °C	mín 232
Punto de Ablandamiento, °C	Informar
Indice de Penetración	-2,0 a +1,0
Película Delgada Rotatoria:	
- Pérdida por calentamiento (%)	máx 0,8
- Viscosidad absoluta a 60°C, 300 mm Hg, poises	Informar
- Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	mín 100
Indice de Ductilidad	máx 4

4.1.2 Caracterización de los Áridos

La dosificación utilizada tiene un tamaño máximo nominal de 20 mm (3/4") para tránsito pesado, la granulometría de los áridos es del tipo semi-densa y corresponde a una banda IV-A-12 tabla (15), banda utilizada por la Constructora Bitumix S.A. en sus mezclas convencionales para recapados y otros trabajos. Ver tabla 4.3.

Tabla 14 - Granulometría de áridos semi-densa. Fuente [12]

Denominación		IV-A-12	IV-A-20
Tamices		Porcentaje que pasa en peso (%)	
(mm)	(ASTM)		
25	(1")		100
20	(3/4")	100	80-95
12,5	(1/2")	80-95	65-80
10	(3/8")	70-85	57-73
5	(Nº 4)	43-58	40-55
2,5	(Nº 8)	28-42	28-42
0,63	(Nº 30)	13-24	13-24
0,315	(Nº 50)	8-17	8-17
0,16	(Nº 100)	6-12	6-12
0,08	(Nº 200)	4-8	4-8

De acuerdo a la dosificación de los áridos en peso, estos se mezclan según las tablas 4.4 y 4.5 para probetas de 1100 y 4500 gramos, respectivamente:

Tabla 15 - Dosificación probetas Marshall a 75 golpes.

Dosificación Probeta 10.2x6.35 1100 (gr)				
Muestra Nº	1	2	3	4
Material	Gravilla 3/4"	Gravilla 1/2"	Polvo Roca	Filler Recuperado
Procedencia	Río Aconcagua	Río Aconcagua	Río Aconcagua	Planta Concón
%	17	35	46	2
Peso (gr)	187	385	506	22

Tabla 16 - Dosificación probetas Superpave (Compactador Giratorio).

Dosificación Probeta 15x12 4500 (gr)				
Muestra N°	1	2	3	4
Material	Gravilla 3/4"	Gravilla 1/2"	Polvo Roca	Filler Recuperado
Procedencia	Río Aconcagua	Río Aconcagua	Río Aconcagua	Planta Concón
%	17	35	46	2
Peso (gr)	765	1575	2070	90

En la tabla 4.6 se muestra la granulometría empleada en la elaboración de las briquetas para los correspondientes ensayos, briquetas de 1100 y 4500 gramos con y sin fibra, Los áridos combinados deben cumplir con los requisitos de la tabla 4.6, donde se muestra la distribución en porcentaje del tamaño de las partículas de árido que aporta cada tipo de material para la confección de las probetas cilíndricas. Por medidas sanitarias no se elaboran probetas de 4500 gramos.

Tabla 17 - Granulometría.

Tamiz (mm) y (pulg)		Gravilla 3/4"	Gravilla 1/2"	Polvo Roca	Filler Recuperado
19	(3/4")	100			
12,5	(1/2")	37	100		
9,5	(3/8")	4	70	100	
4,75	(N°4)	2	9	95	
2,36	(N°8)	1	2	63	
1,18	(N°16)	1	2	43	
0,6	(N°30)	1	1	31	
0,3	(N°50)	1	1	22	
0,15	(N°100)	1	1	16	100
0,075	(N°200)	1	1	12	99

En la figura 4.1 se muestran las herramientas y materiales utilizados en el laboratorio.



Figura 21- Trabajo en laboratorio.

En la tabla 4.7 se presenta las constantes físicas de los áridos del río Aconcagua utilizados por la Constructora Bitumix.

Tabla 18 - Constantes Físicas.

	Unidades	Gravilla 3/4"	Gravilla 1/2"	Polvo Roca	Filler Recuperado
Densidad aparente	(kg/m ³)	1502	1476	1679	1060
Densidad real seca	(kg/m ³)	2639	2632	2619	2627
Densidad neta	(kg/m ³)	2738	2732	2725	2627
Partículas Chancadas (2 c)	(%)	90	93	98,5	-
Partículas Lajeadas	(%)	0	0,7	0,5	-
Índice de Lajas	(%)	10,5	16,3	11,9	-
Desgaste de los Ángeles	(%)	22	14	28	-
	Grado N°	5	6	7	-
Índice de Plasticidad	(%)	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.

4.1.3 Caracterización de la Fibra FORTA-FI

La fibra FORTA-FI se incorpora en los áridos según tres tipos de dosificación, una de 0,05% (recomendada por FORTA Corp.), 0,025% y 0,075% (propuestas de prueba) respecto al peso de la mezcla. Las bolsas entregadas por el proveedor contienen 500 gr de fibra, se realiza un cuarteo según M.C.8.202.2 para agregar la fibra a la mezcla. En la figura 4.2 se puede observar la caracterización de la fibra.



Figura 22 - Caracterización de la Fibra FORTA-FI.

La cantidad de fibra a agregar a una probeta se dividió en tres tercios y dispersó con aire comprimido antes de ser añadida a la mezcla según el método recomendado por la Universidad de Arizona [31]; ver figura 4.2. En la figura 4.3 se muestra la fibra pre-dispersa y la fibra ya mezclada.



Figura 23 - Dispersión y fibra en mezcla.

La Tabla 4.8 muestra las principales propiedades físicas de Aramida (*Kevlar*) y polipropileno (poliolefina) que componen FORTA-FI para mezcla asfálticas en caliente (MAC), Esta combinación de fibras está diseñada para temperaturas de trabajo de 120°C - 190°C, en las plantas tipo “*batch*” (discontinua) o en las plantas de tambor.

Tabla 19 - Propiedades físicas principales de la fibra FORTA-FI. Fuente [26].

Propiedades	Materiales	
	Polipropileno	Aramida
Forma	Fibra retorcida fibrilada	Fibra monofilamento
Gravedad específica	0,91	1,45
Resistencia a la tracción (Mpa)	483	3000
Longitud (mm)	19,05	19,05
Color	Bronceado	Amarillo
Resistencia a ácidos / álcalis	Inerte	Inerte
Temperatura de descomposición (°C)	157	>450

4.2 Ensayos en Laboratorio Realizados a las Mezclas con y sin Fibra

A continuación, se especifican los resultados obtenidos en laboratorio de los siguientes ensayos que se realizaron para evaluar el desempeño frente a mecanismos de fisuración de grietas reflejadas en las mezclas asfálticas con y sin fibra para rehabilitación de caminos.

- Granulometría de áridos.
- Densidad por método Marshall.
- Estabilidad y fluencia Marshall.
- Tracción indirecta a 25°C.
- Módulo de rigidez a 15°C.
- Módulo resiliente diametral para mezclas asfálticas.
- Prueba de flexión semicircular (SCB) a temperatura intermedia (no realizado).

En la figura 4.4 se presentan los instrumentos y briquetas confeccionadas en laboratorio.



Figura 24 - Instrumentos y briquetas confeccionadas en laboratorio.

4.2.1 Granulometría de Áridos

Se realizó la granulometría de los áridos de acuerdo a M.C.8.202.1, M.C.8.202.2, M.C.8.202.3, M.C.8.202.4 y M.C.8.202.6. La granulometría obtenida se compara con la banda de diseño [IV-A-12] del tipo semi-densa, los resultados se muestran a continuación en las tablas 4.9 y 4.10.

Tabla 20- Granulometría para mezclas control y con fibra FORTA-FI.

Tamiz (mm) y (pulg)		% que pasa
19	(3/4")	100
12,5	(1/2")	89
9,5	(3/8")	73
4,75	(Nº4)	49
2,36	(Nº8)	32
1,18	(Nº16)	23
0,6	(Nº30)	17
0,3	(Nº50)	13
0,15	(Nº100)	10
0,075	(Nº200)	8

Tabla 21 - Características de los áridos.

Características de los áridos	%	%
Partículas Chancadas	95	Mín. 90
Partículas lajeadas	0,5	Máx. 10

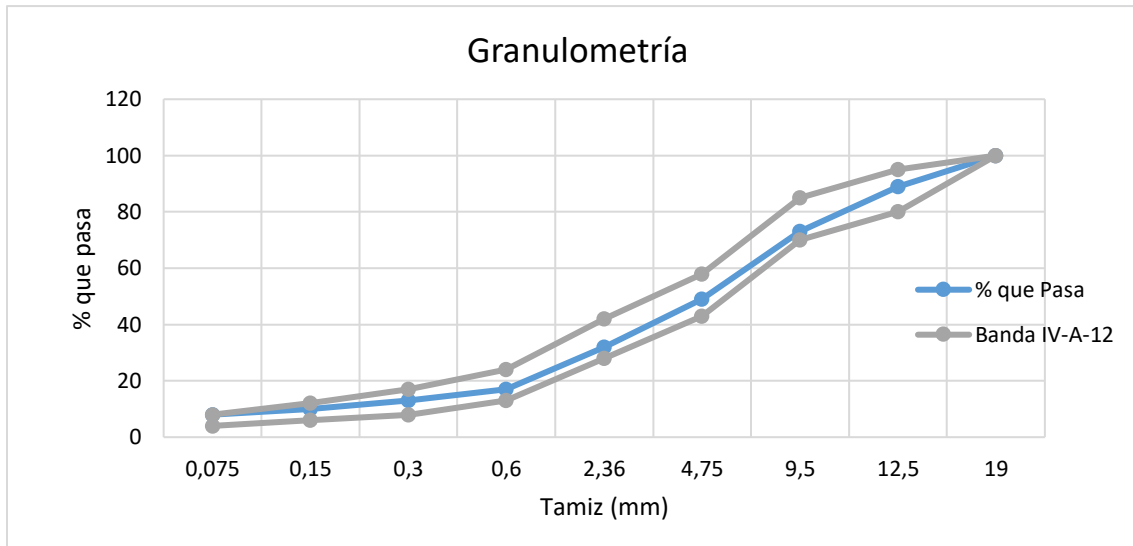


Figura 25 - Banda IV-A-12 versus granulometría obtenida.

Como se observa en la figura 4.5, los áridos del río Aconcagua proporcionados por Bitumix S.A. son aptos para ser utilizado en la construcción de recapados ya que cumplen con la banda [IV-A-12], las partículas chancadas son superiores al porcentaje mínimo 90% y las partículas lajeadas inferiores al máximo 10%.

4.2.2 Densidad por Método Marshall

Por el método Marshall M.C.8.302.40 fueron elaboradas probetas de 1100 gr con y sin fibras FORTA-FI, compactadas a 75 golpes por cara. Luego se procede a determinar su densidad de acuerdo al método M.C.8.302.38 (B). Los resultados se muestran y comparan a continuación en la tabla 4.11.

Tabla 22- Densidad de mezclas asfálticas por método Marshall.

Dosificación	P1	P2	P3	Promedio densidad (kg/m ³)
Control	2311,70	2326,13	2328,51	2322,11
0,025%	2335,45	2339,72	2348,72	2341,30
0,050%	2320,12	2328,98	2332,31	2327,14
0,075%	2287,58	2335,45	2351,92	2324,98

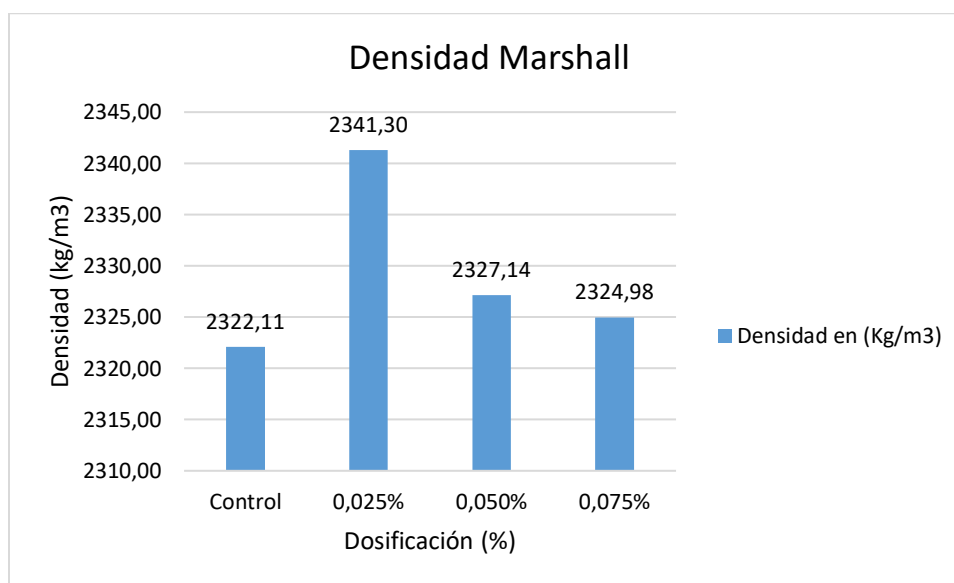


Figura 26 - Promedio densidad Marshall.

De la figura 4.6 se entiende que la mezcla con 0,025% de fibras alcanza una mayor densificación, esto genera un impacto favorable en el proceso constructivo, podría darse el caso, que con menos energía de compactación (pasadas de rodillo) cumpla con la mínima compactación exigida por el diseño original. En las otras dosificaciones estudiadas se observan resultados favorables; se mantienen en el rango de diseño y son superiores a la probeta control.

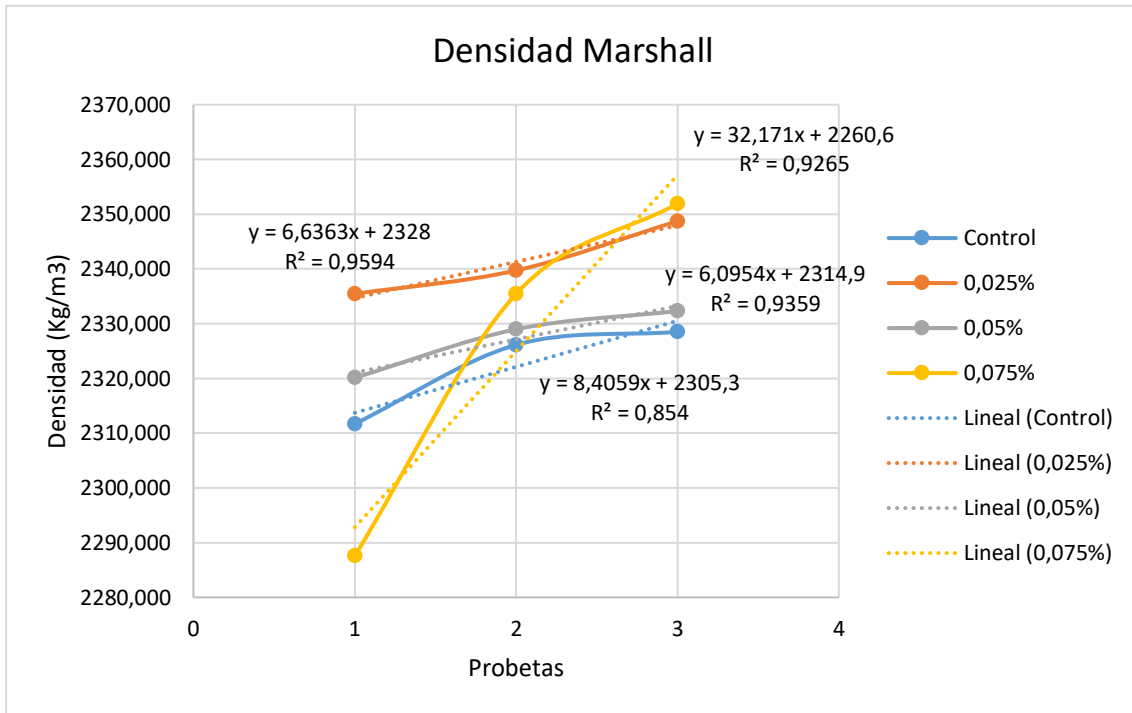


Figura 27– Densidad Marshall.

La densidad de cada conjunto de probetas, de acuerdo a la figura 4.7, tiene un coeficiente de determinación cercanos al 90 % manteniendo una tendencia.

4.2.3 Estabilidad y Fluencia Marshall

4.2.3.1 Estabilidad Marshall

Se elaboraron 3 probetas por dosificación según método Marshall M.C.8.302.40 sumando un total de 12 briquetas que se ensayaron para determinar su estabilidad. En la figura 4.8 se muestra el ensayo.



Figura 28 - Ensayo estabilidad y fluencia en prensa Marshall.

En la tabla 4.12 se aprecian los resultados del ensayo Marshall, en briquetas compactadas a 75 golpes por cara. Todas las muestras ensayadas cumplen con el mínimo exigido por el Manual de Carreteras que es de 9000 (N).

Tabla 23 - Estabilidad Marshall con y sin fibra FORTA-FI.

Dosificación	P1	P2	P3	Promedio Estabilidad (N)
Control	9558,22	9529,52	11832,17	10306,64
0,025%	12682,46	12897,18	11741,6	12440,41
0,050%	11623,05	11820,06	10228,26	11223,79
0,075%	13457,34	9830,7	11637,6	11641,88

La figura 4.9 corresponde a un gráfico que muestra la tendencia de estabilidad versus dosificación de fibra utilizada en cada grupo de probetas. Los distintos grupos de briquetas mantiene un coeficiente de determinación cercanos al 90%, ajustándose a una línea recta.

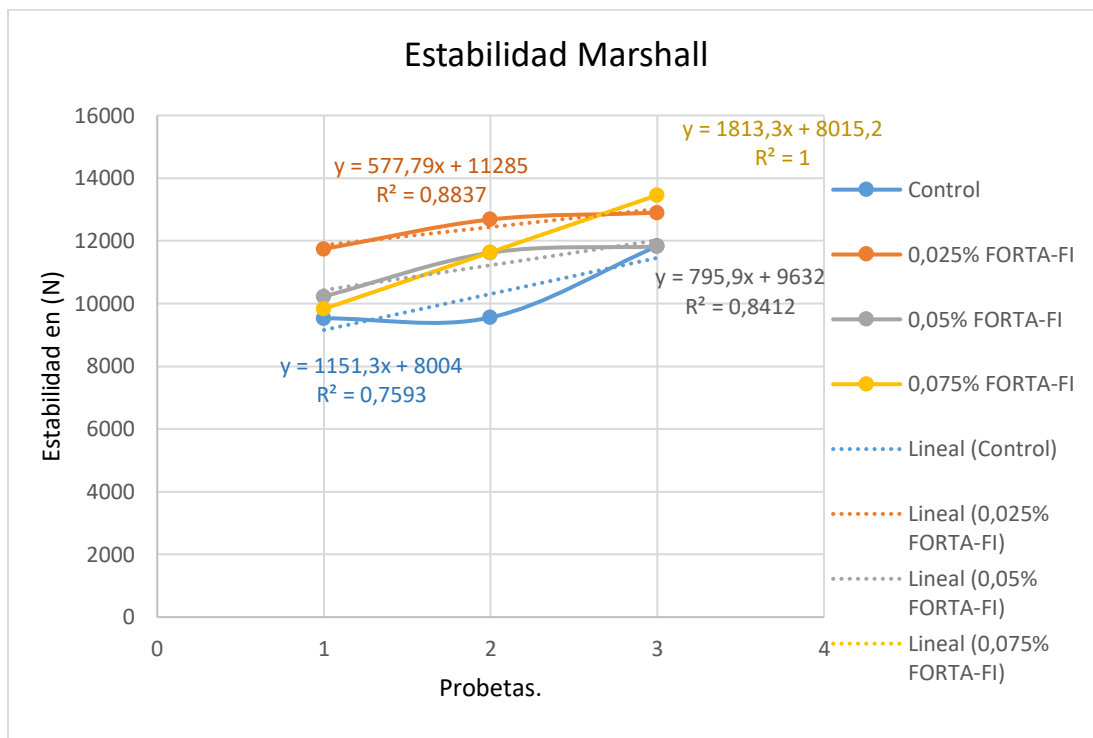


Figura 29 – Gráfico de tendencias Estabilidad Marshall.

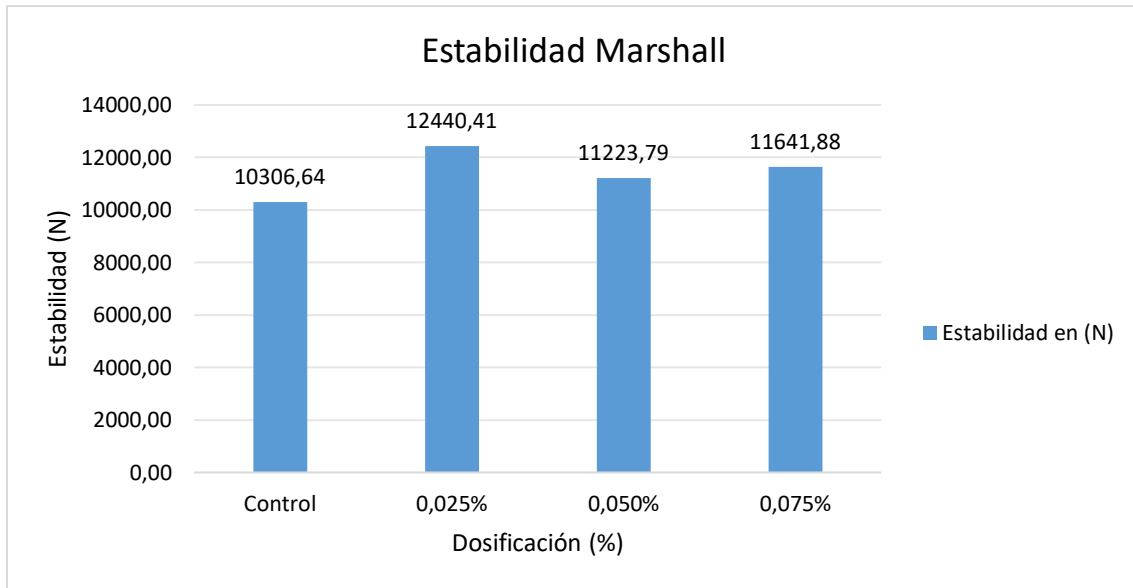


Figura 30 – Estabilidad Marshall promedio.

En la figura 4.10 se distingue que las probetas con 0,025% de FORTA-FI presentan una Estabilidad mayor que las probetas 0,05% y 0,075%. La diferencia entre la probeta control y la probeta con 0,025% de FORTA-FI alcanza un 20,7%. Los valores de la mezcla con y sin fibra son coherentes y superiores respecto a lo que normalmente es usado por la Constructora Bitumix S.A. que es de 9893,8 (N) con un 4,9% de CA-24, la diferencia en estabilidad entre las probetas con 0,025% y las normalmente utilizada alcanza un 25,74% estos resultados son bastante favorables superiores al mínimo de 9000 (N) recomendado por las normativas del M.C.

4.2.3.2 Fluencia Marshall

La Fluidez es la deformación que se produce en la carga máxima, se mide en un cuarto de milímetro 0,25 mm (cuartos de milímetro) o (1/100 pulg), en una curva fluidez vs % asfalto, la fluidez aumenta al aumentar el contenido de asfalto. En la tabla 4.13 se muestra la fluencia para los distintos porcentajes de FORTA-FI.

Tabla 24 - Fluencia con y sin FORTA-FI.

Dosificació n	P1	P2	P3	Promedio fluencia (0,01pulg)
Control	15,54	17,67	12,50	15,23
0,025%	18,29	14,12	14,10	15,50
0,050%	12,04	18,33	13,75	14,71
0,075%	15,12	10,70	13,70	13,18

En la figura 4.11, se observa que hay un elevado nivel de fluencia de todas las probetas para una misma carga, los resultados se mantiene en el rango 8 -16 (0,01 pulg) resultados aceptables que aprobarían cualquier inspección, no está de más mencionar que se debería tener menor nivel de fluencia en obra debido al envejecimiento del pavimento, al comparar los resultados de la probeta patrón versus la probeta con mayor fluencia (0,025% de FORTA-FI) las briquetas con fibra tiene 1,77% de mayor capacidad de fluencia.

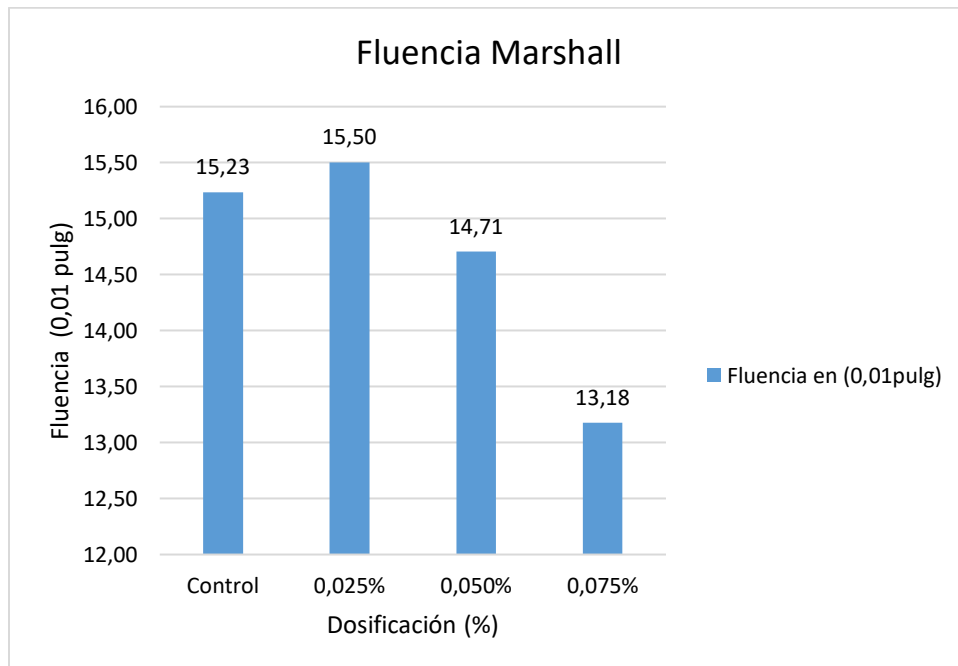


Figura 31- Fluencia Marshall promedio.

La fluencia va directamente relacionada con la cantidad de asfalto, a mayor porcentaje de asfalto mayor debería ser la capacidad de fluencia de la mezcla. Este valor de fluencia debería verificarse con respecto a los vacíos del agregado mineral (VAM), a fin de asegurar que la mezcla contenga un volumen de asfalto suficiente, sin que el volumen de vacíos de aire sea reducido a un valor inaceptable. Pero la Unidad de Gestión de Calidad y Laboratorio de la Región de Valparaíso no cuenta con equipos para medir este parámetro.

4.2.4 Tracción Indirecta a 25°C

Un grupo de probetas confeccionadas por el método (MC V8; 8.302.40), se ensayaron mediante tracción indirecta según método (MC V5; 5.413.205(2)), en condición seca y saturada, utilizando el cabezal de ruptura *Lottman*, figura 4.12. Antes de ser ensayada se determinó la densidad según (MC V8; 8.302.38(c)) y se descartó las probetas que diferían de la densidad promedio en 50 (kg/m³), se evaluó con este ensayo el comportamiento ante la fatiga en condición seca y saturada de la mezcla con y sin fibra. Los resultados se muestran en la tabla 4.14.

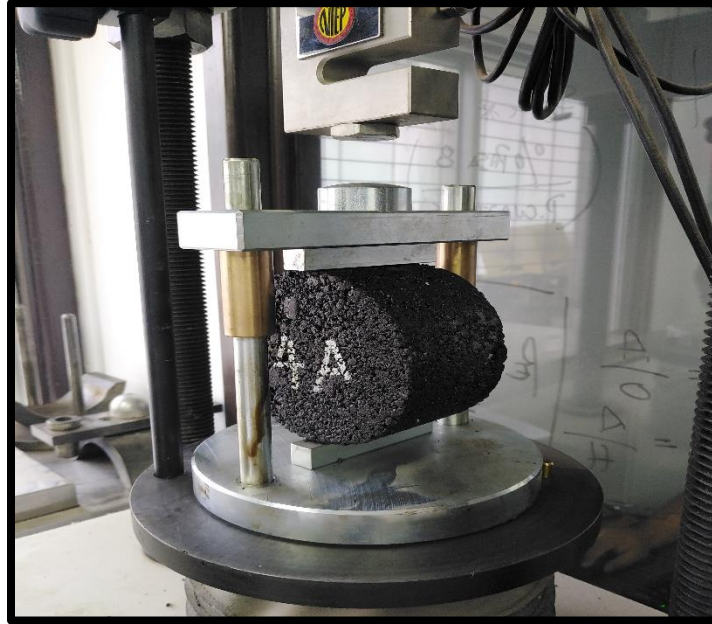


Figura 32- Cabezal de Ruptura Lottman.

Tabla 25 - Tracción Indirecta Promedio de Probetas Marshall a 25 °C.

Dosificación	Promedio Saturado (kPa)	Promedio Seco (kPa)	IRC (TSR) (%)
Control	937,15	687,71	136,27
0,025%	1184,25	844,10	140,30
0,050%	1165,68	856,17	136,15
0,075%	1246,89	857,06	145,48

En la figura 4.13 se puede apreciar un mejor comportamiento de las mezclas con FORTA-FI en 24,63% en condición seca y un 33,05% en condición saturada para el grupo de briquetas con 0,075% de adición de FORTA-FI versus briquetas de control, los mejores resultados se lograron en condición saturada, esto nos indica que la adición de fibra favorecería las obras de recapados en ambientes más expuestos a la humedad, no está demás mencionar que todas las probetas ensayadas cumplen lo recomendado por el M.C. Volumen. 5 que es ITS seco mayor a 200 (kPa).

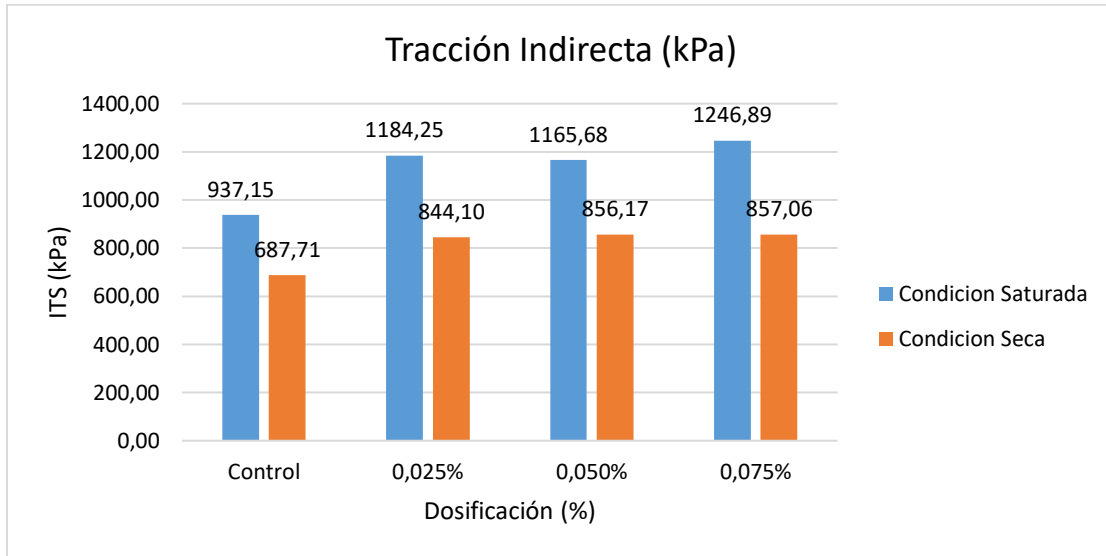


Figura 33 - Tracción Indirecta Promedio.

Una vez realizados los ensayos de ITS, en estado seco y saturado, se calcula la resistencia a la tracción retenida (TSR) o índice de resistencia conservada (IRC); ver figura 4.14. Parámetro que evalúa la susceptibilidad al agua de cada mezcla, se aprecia que la mezcla patrón tiene la misma susceptibilidad a la humedad que la dosificación recomendada por Forta (0,05%), además todas las probetas ensayadas superan con creces lo recomendado en el M.C. Volumen 5, que es TSR superior al 50% para la zona norte y 75% para el resto del país.

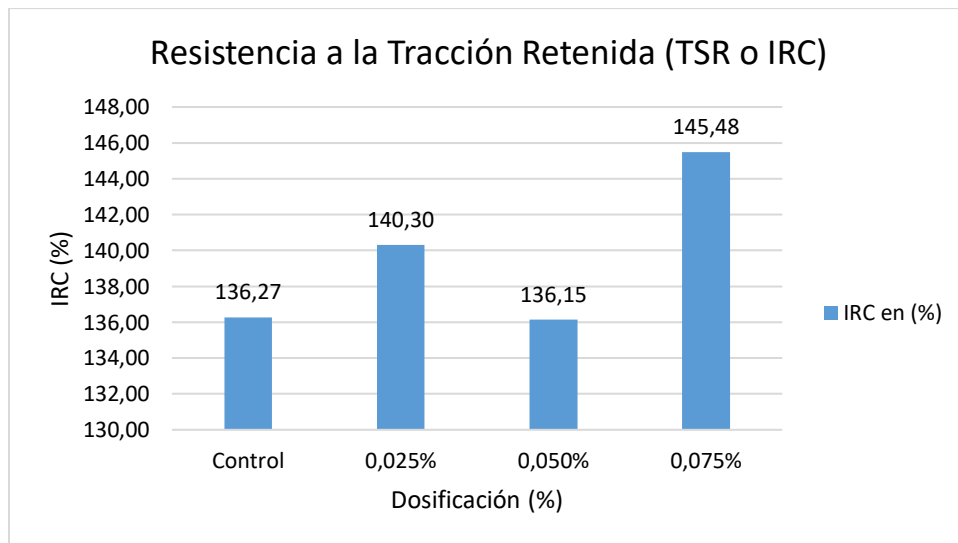


Figura 34- TSR o IRC %.

La figura 4.15 corresponde a una briqueta elaborada con 0,05% de FORTA-FI; en ella es fácil apreciar la fisura provocada por el ensayo a tracción indirecta en concisión saturada.

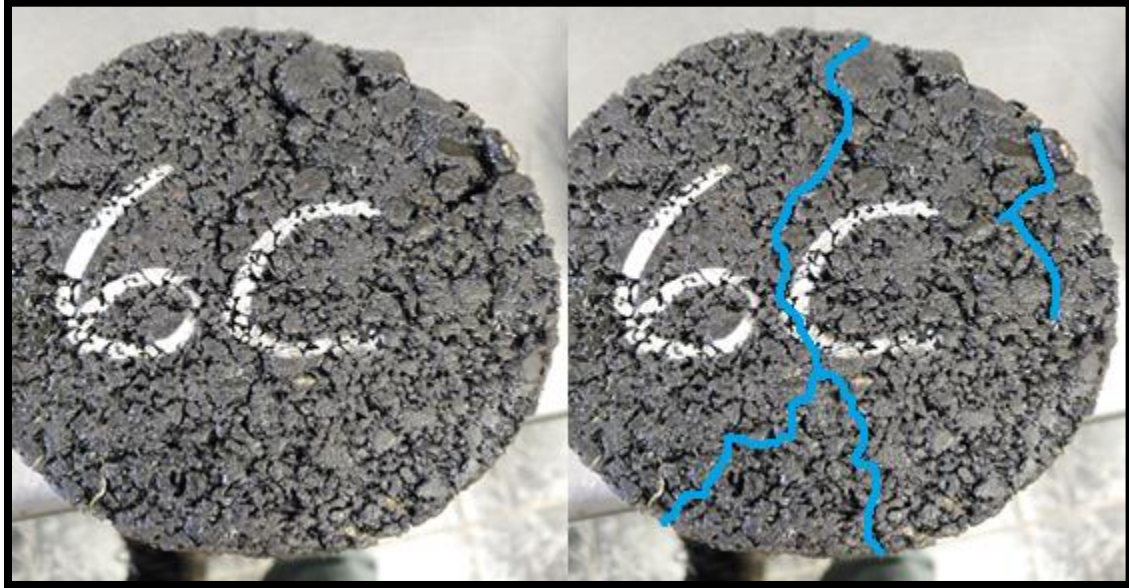


Figura 35 - Fisura ensayo Tracción Indirecta.

4.2.5 Módulo de Rigidez

Se confeccionan grupos de cuatros briquetas por dosificación según el método (MC V8; 8.302.40), se ensayaron mediante el procedimiento descrito en la norma europea (UNE-EN 12697-26:2012: Rigidez. Anexo C, Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY)), antes de ser ensayada se determinó la densidad según (MC V8; 8.302.38) y se descartó las probetas que diferían de la densidad promedio en 1 %, se evaluó este ensayo a una temperatura de 25 °C, con el fin de poder utilizar el valor del módulo de Poisson igual a 0,35, este ensayo tiene como objetivo calificar la rigidez de una mezcla asfáltica y estimar el desempeño estructural de un recapado asfáltico con la adición de FORTA-FI. Los resultados se muestran en la tabla 4.15.

Tabla 26 - Módulo de Rigidez Promedio de Probetas Marshall a 25 °C.

Dosificación	P1	P2	P3	P4	Promedio E Mpa
Control	318,72	340,82	244,12	222,84	281,62
0,025%	445,84	332,51	338,25	322,88	359,87
0,050%	311,22	307,07	368,37	338,97	331,41
0,075%	541,51	295,07	339,88	437,15	403,40

La figura 4.16 corresponde a un gráfico que muestra la tendencia de los resultados de cada módulo con respecto a la dosificación de fibra utilizada en cada grupo de probetas. Los distintos grupos de briquetas mantiene un coeficiente de determinación cercanos al 90%, ajustándose a una línea recta.

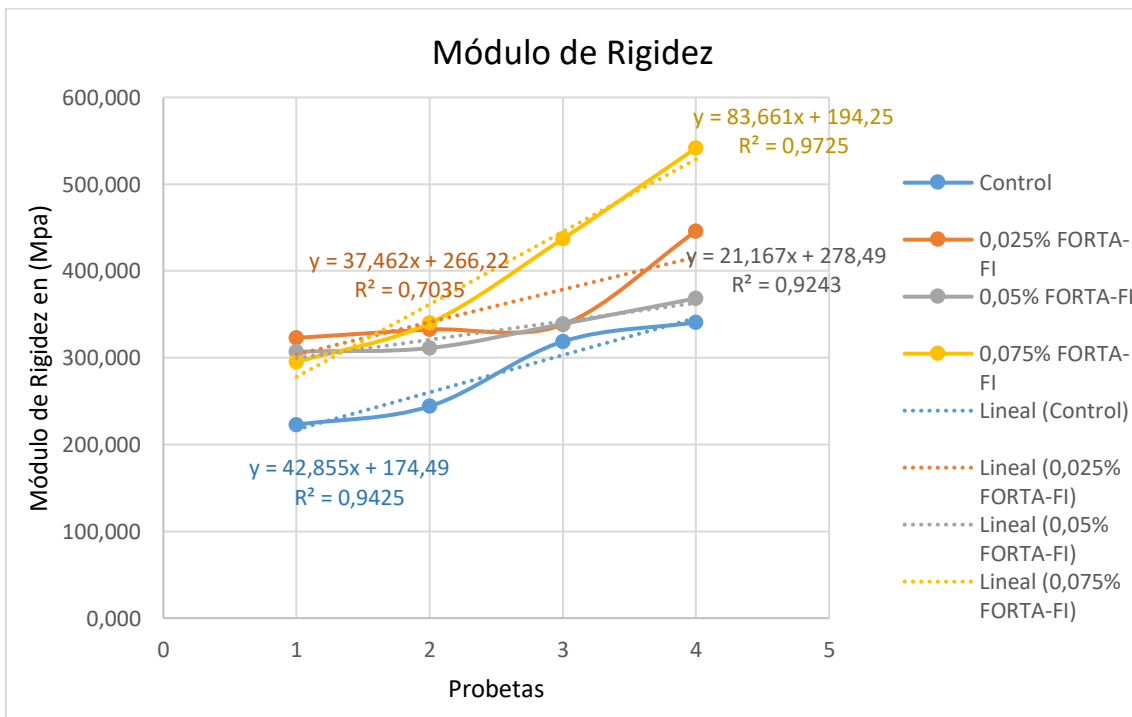


Figura 36 – Grafico tendencias Módulo de Rigidez.

Se analizan y comparan los resultados del ensayo, en el gráfico de la figura 4.17 se puede apreciar un mejor comportamiento de las mezclas con FORTA-FI, el mayor módulo es 69,67 MPa superior en un 43,24% al de la mezcla control, los resultados obtenidos muestran que las fibras mejoran el módulo de rigidez de una mezcla convencional en todas sus dosificaciones.

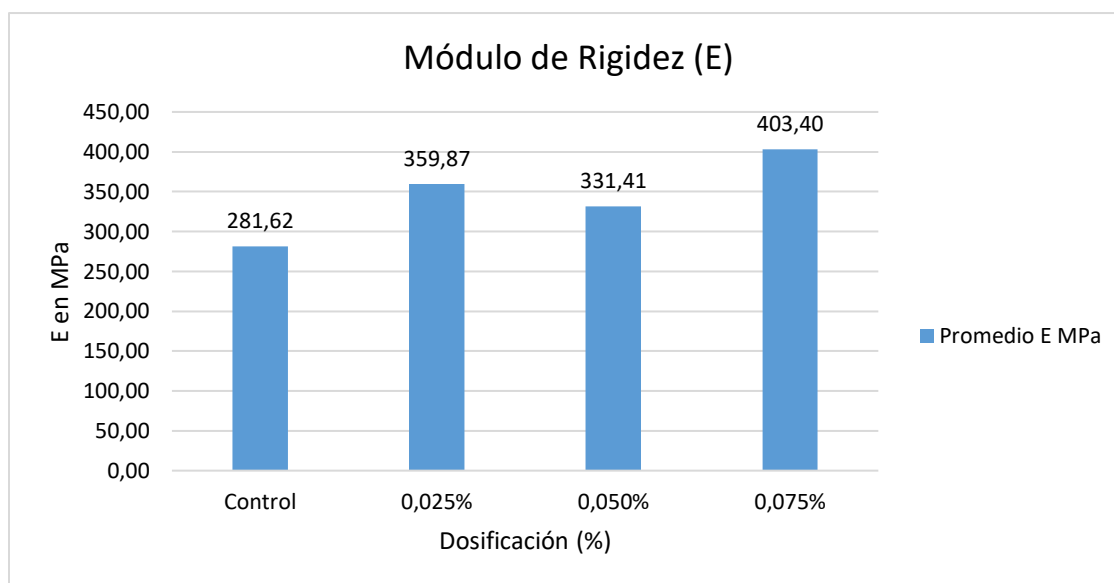


Figura 377 - Módulo de Rigidez Promedio (E) en MPa.

Es relevante señalar que los resultados del ensayo no son fidedignos, ya que la Unidad de Gestión de Calidad y Laboratorio de la Región de Valparaíso del M.O.P. no cuenta con el 100% de aparatos de medición especificados en la norma del UNE-EN 12697-26, por lo que no se recomienda este ensayo como un parámetro relevante al momento de tomar una decisión.

Aun así la realización de este ensayo entrega información del comportamiento estructural de las mezclas bituminosas, ya que sirve para comparar resultados bajo iguales condiciones. Se podría decir que, bajo las mismas, herramientas de medición, sollicitaciones (cargas), temperatura y metodología, se observa un mejor comportamiento de las mezclas con la adición de FORTA-FI.

4.2.6 Módulo Resiliente Diametral para Mezclas Asfálticas

Se elaboran doce probetas asfálticas compactadas a 75 golpes por cara según el método (MC V8; 8.302.40), antes de ser ensayada se determinó la densidad según (MC V8; 8.302.38).

Debido al alto costo que tiene los equipos para realizar el ensaye de módulo de elástico (M_r), el Manual de Carretera Volumen 3, permite determinar el módulo resiliente por métodos indirectos, asociando el módulo de elasticidad (M_r) con el coeficiente estructural y el ensayo de estabilidad Marshall.

Las siguientes ecuaciones, 4.1 y 4.2 permiten estimar el coeficiente estructural (a) en función del ensayo Marshall y el módulo elástico (M_r):

$$a = 0,0078 * (EM)^{0,441}$$

Ecuación 16 – Coeficiente estructural.

$$a = 0,0052 * (e)^{0,555}$$

Ecuación 17 – Coeficiente estructural.

Donde:

EM: Estabilidad Marshall en (N).

e: Módulo elástico o módulo resiliente M_r en (MPa).

El (MC V3; 3.604.107) recomienda usar esta relación para condiciones normales de diseño, con las especificaciones habituales de construcción [28]. En la tabla 4.16 se muestran los resultados:

Tabla 27 - Módulo resiliente promedio de probetas Marshall en Mpa.

Dosificación	P1	P2	P3	Promedio M_r MPa
Control	3022,93	3018,24	3602,64	3214,60
0,025%	3781,94	3827,71	3580,89	3730,18
0,050%	3535,54	3576,63	3197,49	3436,55
0,075%	3968,67	3097,63	3535,30	3533,87

Una vez más los resultados de las mezclas bituminosas con FORTA-FI muestran mejores valores que la mezcla patrón. En el gráfico de la figura 4.18 vemos los M_r obtenidos, estos son 16,03 % superiores a la mezcla control en el caso más favorable, y un 6,9% mayor para la dosificación recomendada por FORTA.

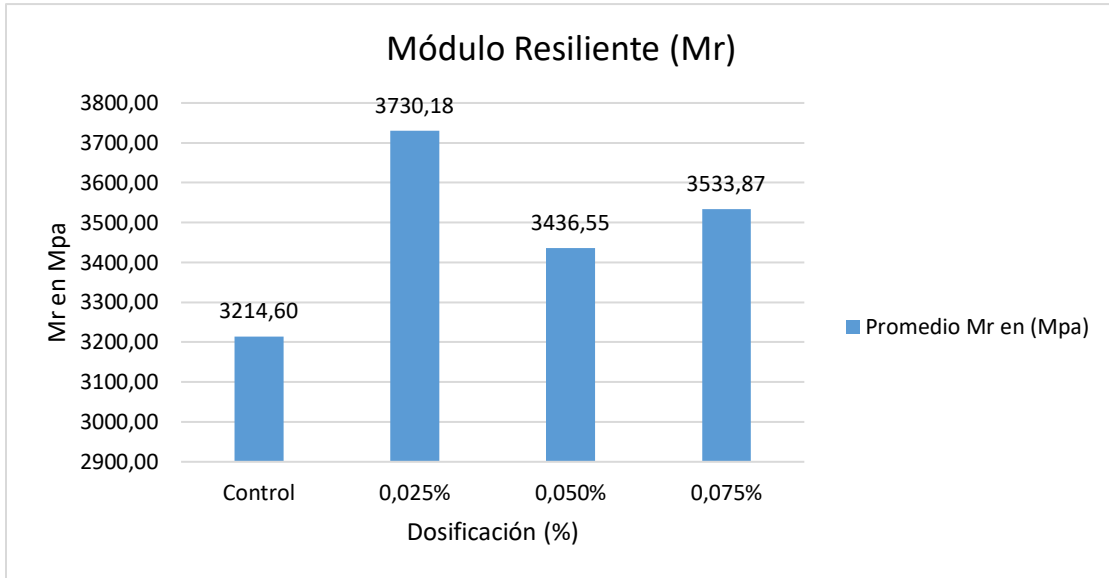


Figura 38 - Módulo resiliente en Mpa.

Los Mr obtenidos para cada conjunto de probetas, de acuerdo a la figura 4.19, tienen un coeficiente de determinación cercanos al 90% manteniendo una tendencia, modulo resiliente versus cantidad de fibra por mezcla.

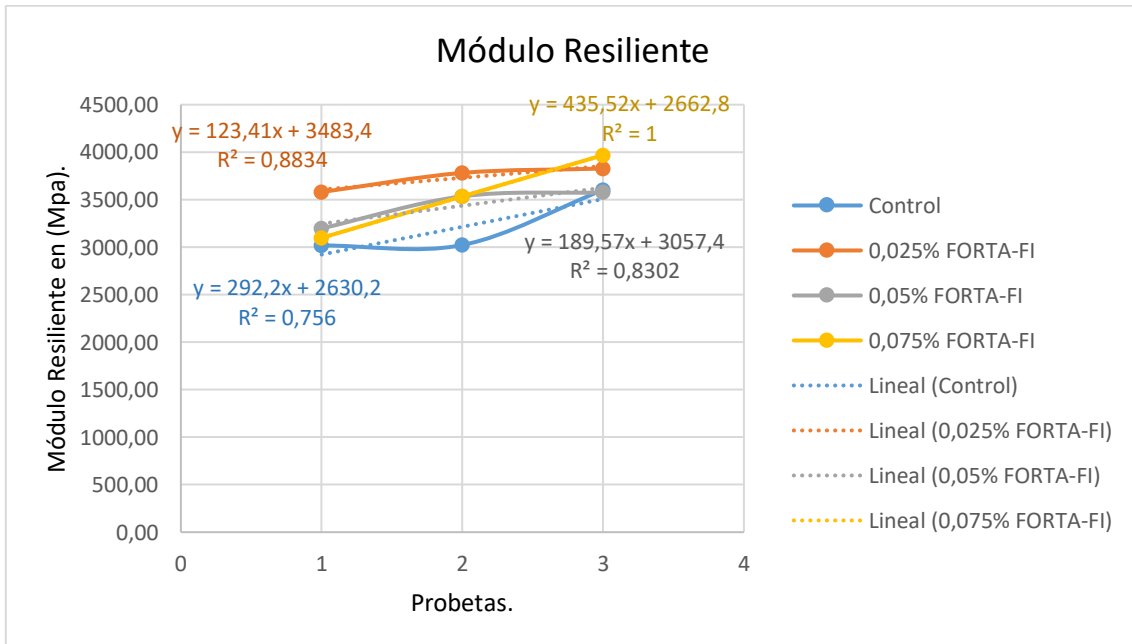


Figura 39- Grafico de tendencias Módulo Resiliente.

Estos resultados entregan información relevante ya que se podría considerar disminuir el espesor de capa debido a que la fibra mejora el coeficiente estructural en un 16,27% sobre el coeficiente estructural recomendado, al tener un módulo resiliente superior debería tener una mayor elasticidad ósea mayor tolerancia a las deformaciones, lo que ayudaría a retardar el afloramiento de grietas reflejadas.

Las tablas 4.17 y 4.18 muestran los coeficientes estructurales obtenidos en laboratorio y de diseño respectivamente.

Tabla 28 - Coeficiente estructural promedio con y sin FORTA-FI.

Dosificación	P1	P2	P3	Promedio coeficiente Estructural
Control	0,44	0,44	0,49	0,46
0,025%	0,50	0,51	0,49	0,50
0,050%	0,48	0,49	0,46	0,48
0,075%	0,52	0,45	0,48	0,48

Tabla 29 - Coeficiente estructural para capas de pavimento M.C. Fuente [28].

CAPA	CARACTERÍSTICAS	COEFICIENTE ESTRUCTURAL
Subbase granular	CBR = 40%	0,12
Base granular	CBR = 80%	0,13
Base asfáltica graduación gruesa	6.000 N	0,33
Base Asfáltica graduación abierta		0,28
Grava-emulsión		0,30
Concreto asfáltico, capa intermedia	8.000 N	0,41
Concreto asfáltico de superficie	9.000 N	0,43
Mezclas drenantes		0,32
Microaglomerado discontinuo en caliente		0,40
Mezcla SMA (Stone Mastic Asphalt)		0,43

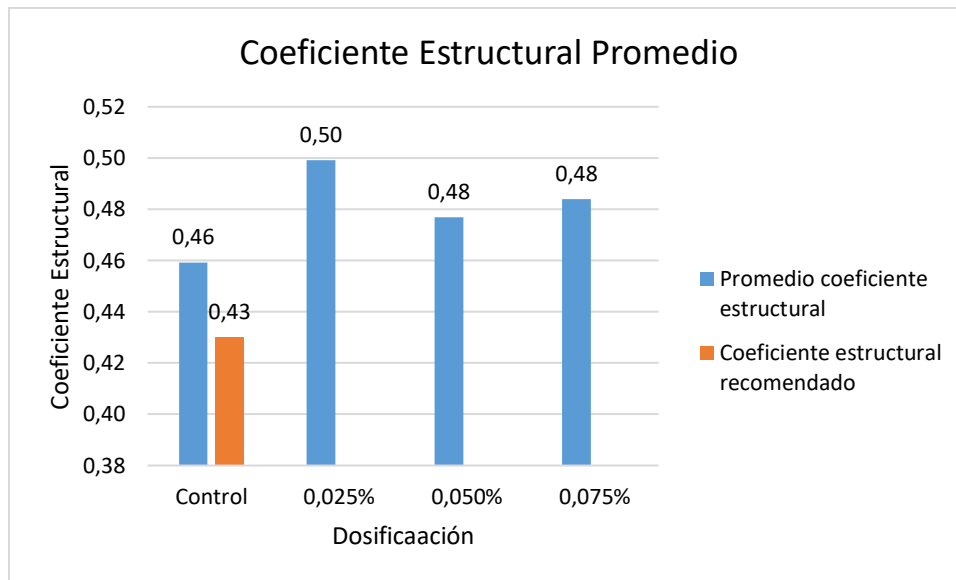


Figura 40- Coeficiente estructural v/s Coeficiente estructural recomendado.

La figura 4.20 compara resultados de los distintos coeficientes estructurales obtenidos con el coeficiente estructural de diseño, no está demás decir que los valores del coeficiente estructural de muestras de planta industrial pueden variar significativamente con los obtenidos en diseño de MAC en laboratorio.

4.2.7 Prueba de Flexión Semicircular (SCB) a Temperatura Intermedia

Esta evaluación a fisuración de la mezcla asfáltica en caliente no fue realizada debido a que no se pudo confeccionar las briquetas de 150 mm de diámetro y 4500 gr de peso del agregado. Debido a que la Unidad de Gestión de Calidad y Laboratorio de la Región de Valparaíso del M.O.P. no contaba con un compactador giratorio disponible y el Laboratorio Nacional no permitía la entrada a personas externas, por motivos del COVID-19.

En su remplazo se realizará la experiencia con núcleos extraídos de obras; la norma ASTM D8044-16 menciona que se puede emplear testigo para la evaluación de la resistencia al agrietamiento, energía de fractura y tenacidad de fractura de mezclas de asfalto utilizando el accesorio de curva semicircular H-1351 (cabezal).

4.3 Cancha de Prueba (Camino de Prueba)

Se elaboró un tramo de prueba con la misma mezcla y correspondientes dosificaciones de FORTA-FI utilizadas en laboratorio, para observar y comparar el comportamiento y resistencia a la floración de grietas ascendentes en recapados de formas más real, para la construcción del tramo de prueba se utilizó la dosificación recomendada por FORTA CORPORATION. No se logró gestionar la aplicación de las otras dos dosificaciones propuestas.

4.3.1 Ubicación Cancha de prueba

Se recarpeteó un tramo de prueba con fibra y el resto con un asfalto tradicional, de acuerdo a la dosificación propuesta por el proveedor 500 gr de FORTA-FI por tonelada de mezcla, se utilizó para recarpetear la misma mezcla de diseño utilizada en las experiencias realizadas en laboratorio, carpeta 20 mm (3/4”), banda (IV-A-12) y un CA-24. La obra se ubica en el proyecto de obra “Conservación de la Red Vial Básica, Conservación Periódica Ruta 60 CH Cruce Ruta 5 (Llay Llay) – túnel Cristo Redentor, comuna de Panquehue, Provincia de San Felipe, Región de, Valparaíso”, sector : Ruta 60CH, Cruce Ruta 5 (Llay Llay) – Túnel Cristo Redentor, tramo: Dm 8.620 a Dm 32.143 que une las comunas de Panquehue y San Felipe, provincia de San Felipe.

Se recarpeteó un tramo de una calzada bidireccional de 3,5 metros de ancho por pista y berma a ambos costados.

Previo a la colocación del recapado asfáltico, se realizó una reparación del pavimento existente, trabajo de fresado de la capa superior, sellos de grietas y bacheos correspondientes.

El sector específico en donde se aplicó mezcla con fibra FORTA-FI se ubica entre los kilómetros 31.990 y 32.142 de la ruta que une el sector de Tres Esquinas y el Acceso a la ciudad de San Felipe, el tramo tiene una longitud de cada pista de 153 metros y un ancho de 3,5 metros además de 1,9 metros de berma por ambos lados.

La capa de rodadura del recapado con y sin fibra tiene un espesor de 6 centímetros.

La producción de la mezcla se efectuó en la planta Ciber con mezclador externo, el proceso requirió la instalación de un aditamento al mezclador de la planta, el cual consistió en un embudo metálico que en su parte inferior tenía una conexión a tubería de aire, de forma que la fibra se mantuviera en movimientos en la inyección al mezclador.

La construcción del recapado se realizó en los días 20 y 25 de mayo del año 2020, la temperatura de producción de la mezcla en planta osciló entre los 172 y 175°C. La pista izquierda fue la primera en construirse el día 20 de mayo con una temperatura ambiente de 13°C, la temperatura de la mezcla al momento de su instalación fue de 160°C y la temperatura de compactación entre 156 y 158°C. La pista derecha se construyó el 25 de mayo, en condiciones climáticas muy distintas, una temperatura ambiente de 26°C, la temperatura de colocación de la mezcla estuvo en un rango de 157 y 158°C, cabe mencionar que la mezcla con y sin fibra (ver figura 4.21) no presentó problemas en el proceso de descarga, colocación y compactación, el grado de densificación se logró con el mismo ciclo de rodillo para mezcla con y sin fibra, logrando valores entre 98,2 y 98,8 %.



Figura 411 - Trabajos de recapado con y sin fibra.

En la figura 4.22 se puede apreciar que la distribución de la fibra en planta concuerda visualmente con la distribución de la fibra en laboratorio, mostrada anteriormente en la figura 4.3, se logra una distribución homogénea en toda la mezcla, además la temperatura de mezclado y compactación en obra cumple con las especificaciones del diseño de Bitumix S.A.



Figura 422 - Temperatura y dispersión en obra.

4.3.2 Toma de Muestras (Testigos) en Camino de Prueba

Se tomaron muestras, núcleos cilíndricos de los recapados después de cuatro meses de terminada la obra, con el fin de evaluar y comparar de forma tangible el comportamiento mecánico y la resistencia a la reflexión de grietas y resistencia a la fractura de la mezcla propuesta. Se desarrolló un nuevo plan de trabajo de toma de muestras y pruebas desarrolladas para evaluar el desempeño de los testigos con y sin fibra, ya que solo se logró hacer una cancha de pruebas con la dosificación recomendada por FORTA, el nuevo plan de trabajo considera sólo una dosificación de fibra 0,05% y la mezcla patrón. El plan de extracción de testigos se muestra en la tabla 4.19:

Tabla 30- Cantidad de testigos.

		Testigos Control	Testigos con FORTA-FI	TOTAL
Ensayos	Testigos de Calibración	Sin FORTA-FI	500 gr	Total de Probetas por Ensayo
Curva Semi-Circular (SCB) a Temperatura Intermedia	2	8	8	18

4.3.3 Evaluación de Testigos

Se extrajeron los siguientes núcleos asfálticos con la Testiguera diamanta de 150 mm de diámetro. La tabla 4.20 indica la cantidad de testigos, kilometraje y pista de donde fue extrado cada núcleo.

Tabla 31 - Testigos de obra.

CON FIBRA			SIN FIBRA		
Testigo	Kilometraje	IZQ/DER	Testigo	Kilometraje	IZQ/DER
A	32005	DER	J	30080	DER
B	32020	IZQ	K	30080	IZQ
C	32035	DER	L	30490	DER
D	32050	IZQ	M	30490	IZQ
E	32065	DER	O	30900	DER
F	32080	IZQ	P	30900	IZQ
G	32095	DER	Q	31310	DER
H	32110	IZQ	R	31310	IZQ
I	32120	DER	S	31720	DER

Por geometría no se puede trabajar directamente con los núcleos de obra, se realizó un acondicionamiento geométrico (ver figura 4.23), aserrado para darle la altura adecuada de 57 mm aproximadamente, espesor requerido para ensayo SCB.

Además, se procede según la norma ASTM D8044-16 a cortar los testigos de forma Semi-Circular y hacer una muesca en el centro para inducir la falla, se hacen tres tipos de muesca 25, 32 y 38 mm de profundidad respectivamente.



Figura 433 - Acondicionamiento geométrico según norma D8044-16.

4.3.3.1 Densidad de Testigos

Se determinó la densidad de los testigos por el método M.C.8.302.38 (B). Los resultados se muestran y comparan a continuación en la tabla 4.21.

Tabla 32 - Densidad Testigos.

CON FIBRA		SIN FIBRA	
Testigo	Densidad (kg/m ³)	Testigo	Densidad (kg/m ³)
A	2317,38	J	2294,33
B	2309,86	K	2168,97
C	2263,50	L	2314,15
D	2322,69	M	2276,85
E	2208,72	O	2283,68
F	2301,49	P	2227,89
G	2226,92	Q	2284,47
H	2259,34	R	2295,83
I	2246,51	S	2331,13
Promedio	2272,93	Promedio	2275,26

Se observa en la tabla 4.21 que el promedio de la densidad de los testigos con y sin fibra es similar, es decir la aplicación de la fibra no afectaría esta propiedad en obra.

Además, se advierte que los resultados son menores a las densidades obtenidas en laboratorio, lo que debería ser totalmente distinto ya que tendría que existir una densidad mayor en obra. Es posible que los resultados sean menores producto de la diferencia en la geometría (diámetro), ya que los testigos tienen un diámetro superior a las probetas de 102 mm de diámetro. O producto del acerrado y manipulación de las muestras de obra, que pudo dañar la película impermeable de asfalto.

Pero la densidad de las probetas y testigos con y sin fibra son similares entre sí, demostrando que la aplicación de la fibra no afecta la densidad, ver tabla 4.22.

Tabla 33 - Densidad Probetas vs Testigos.

Dosificación	Probetas	Testigos
Control	2322,11	2275,26
0,05%	2327,14	2272,93

La densidad de cada conjunto de probetas, de acuerdo a la figura 4.24, tiene un coeficiente de determinación cercanos al 90 % manteniendo una tendencia similar a las probetas compactadas en laboratorio.

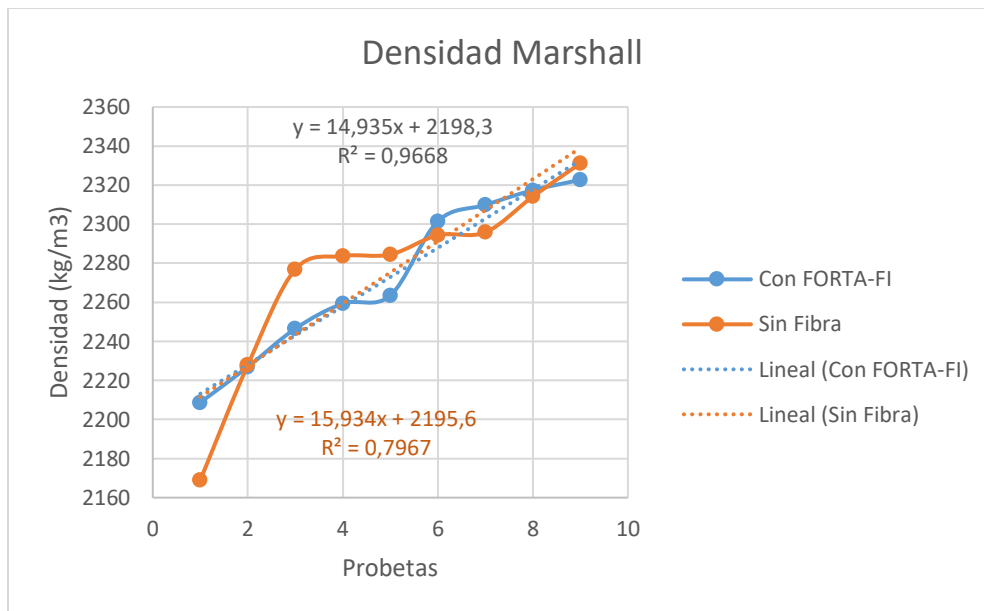


Figura 44 - Densidad Marshall.

4.3.3.3 Prueba de Flexión Semicircular (SCB) a Temperatura Intermedia

Se realizó con los recursos disponibles por el Laboratorio Regional de Vialidad el ensayo SCB, figura 4.25, para determinar el aporte de la fibra FORTA-FI a la resistencia a fisuración de las mezclas asfálticas tradicionales con el fin de retardar la aparición de grietas reflejadas en recarpeteos asfálticos.

Por medio del ensayo se determina la tasa de liberación de energía crítica J_c (KJ/m²), esta se utiliza como parámetro para evaluar la resistencia al agrietamiento de los testigos y probetas de mezclas asfálticas a una temperatura intermedia. Esta propiedad de las mezclas de asfalto se determina midiendo la energía de deformación a la falla que corresponde al área bajo la curva del gráfico de esfuerzo versus deformación para cada profundidad de muesca.



Figura 45 - Ensayo SCB Laboratorio regional de Vialidad.

Se define la temperatura de ensayo, según las temperaturas medias anuales ponderadas (TMPA) de la estación río Aconcagua en Chacabuquito de la tabla 3.604.108.A del Manual de Carreteras Vol.3 que es 16,7 °C y según la ecuación 4.3.

$$PGIT = TMPA + 4 = 20,7 \text{ °C}$$

Ecuación 18 - Temperatura de grado de rendimiento intermedio.

La temperatura de grado de rendimiento intermedio (°C) que se utiliza son 21 °C, ya que se aproxima al valor superior.

La elección de la temperatura intermedia es arbitraria ya que se escoge dependiendo del lugar donde se utilizará el asfalto, ya que su desempeño depende del clima de la zona donde se aplique.

Resultado ensayo SCB: Se realiza la experiencia a la temperatura indicada anteriormente, y se registran los valores de cargas versus deformación.

En la figura 4.26 vemos un medio disco ensayo en la Unidad de Gestión de Calidad y Laboratorio de la Región de Valparaíso del M.O.P. en la imagen podemos apreciar la grieta provoca por la carga monotónica aplica.

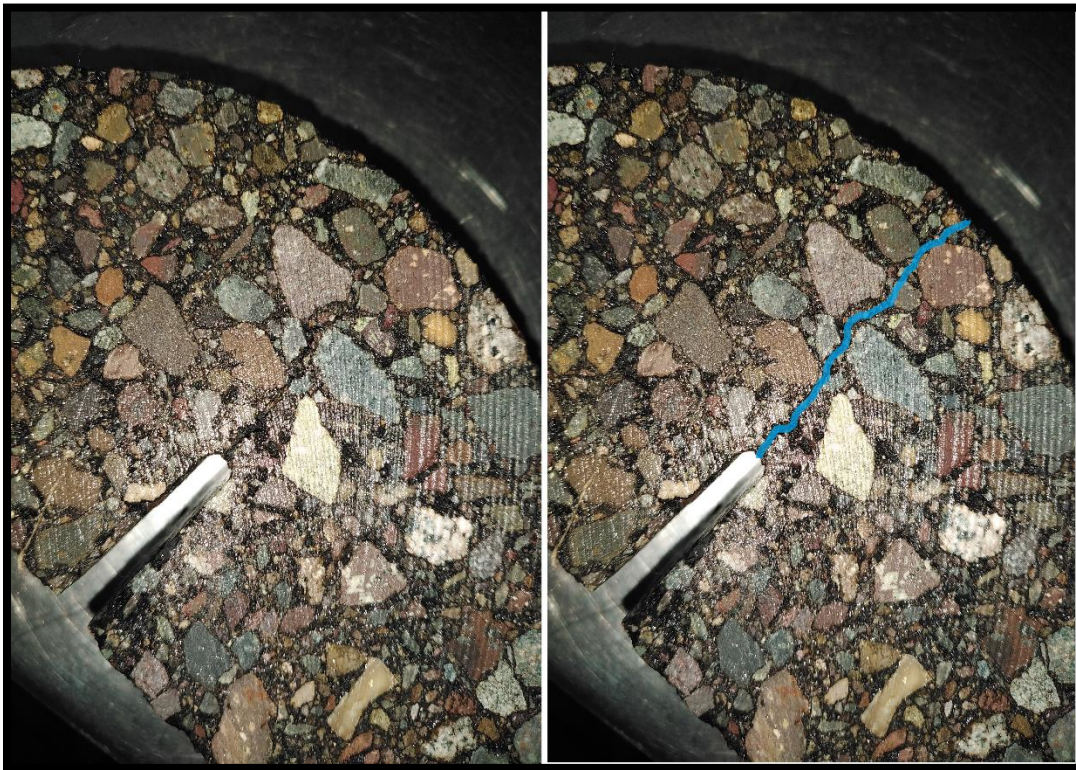


Figura 46 - Falla Testigo.

En la tabla 4.23 se puede apreciar las cargas máximas con sus correspondientes deformaciones con y sin fibra para cada profundidad de muesca.

Tabla 34 - Cargas máx. y deformaciones por profundidad de muesca.

Con Fibra					Sin Fibra				
Testigos	Muesca	Muesca (m)	Carga máx (N)	Deformación (m)	Testigos	Muesca	Muesca (m)	Carga máx (N)	Deformación (m)
A1	25	0,025	1210	0,001143	J1	25	0,025	1090	0,001079
A2	25	0,025	950	0,00091	J2	25	0,025	1160	0,001153
B1	25	0,025	1210	0,000984	K1	25	0,025	1250	0,001471
B2	25	0,025	1410	0,001016	K2	25	0,025	1290	0,001672
C1	32	0,032	950	0,000995	O1	32	0,032	1150	0,001418
C2	32	0,032	760	0,000762	O2	32	0,032	1040	0,001376
D1	32	0,032	1320	0,001185	Q2	32	0,032	1140	0,000984
D2	32	0,032	1460	0,0011	P2	32	0,032	900	0,000878
G1	38	0,038	750	0,000825	L1	38	0,038	600	0,00109
G2	38	0,038	630	0,001048	Q1	38	0,038	1170	0,000931
F1	38	0,038	820	0,000931	M1	38	0,038	720	0,000762
F2	38	0,038	920	0,000868	M2	38	0,038	740	0,000741

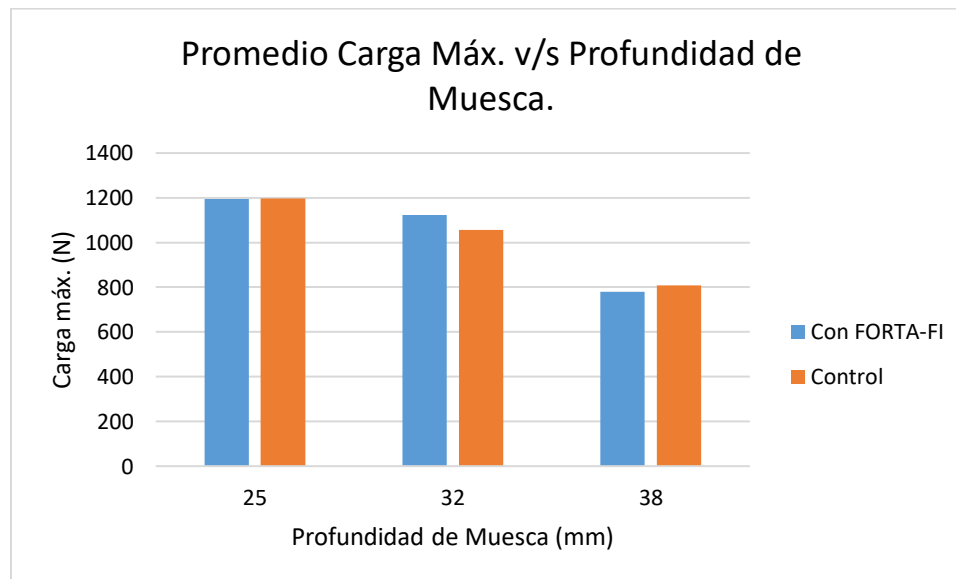


Figura 47 - Promedio Carga Máx. v/s Profundidad de Muesca.

Como se logra apreciar en la figura 4.27, FORTA-FI no hace un gran aporte a la resistencia refiriéndose a la magnitud de las cargas monotónica que resistió cada testigo, por el método de ensayo que recomienda la ASTM D8044-16, pero no es función de este ensayo determinar la carga máxima sino la energía de deformación, aun así, se puede interpretar con una información válida.

Si se evalúa de la misma forma las deformaciones referidas a estas magnitudes de esfuerzos, en la figura 4.28 se observa que los testigos con fibra tiene menores deformaciones, esto está directamente relacionado con el sistema de refuerzo tridimensional que aporta FORTA-FI a las mezclas asfálticas, resultando una mezcla más rígida a temperatura intermedia 21°C, aportando a la

rigidez y durabilidad de los recapados a la temperatura escogida retardando la fractura y el reflejo de las grietas, necesitando esfuerzos mayores para deformar la capa asfáltica.

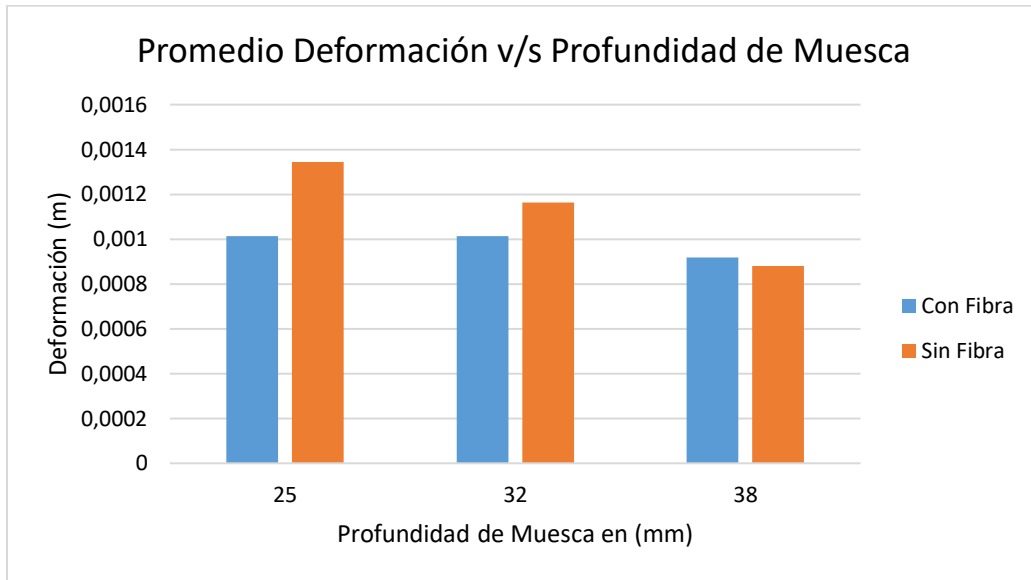


Figura 48 – Promedio Deformaciones v/s Profundidad de muesca.

Con los datos registrados del ensayo se crearon gráficos de esfuerzo v/s deformación con el fin a determinar la energía de deformación a la falla, que correspondería al área bajo la curva del correspondiente gráfico, para cada medio disco ensayado, para esto el ensayo de prueba de Curva Semi-Circular (SCB) a Temperatura Intermedia recomienda ajustar la curva a un polinomio de sexto orden he integrar para encontrar su área por cada profundidad de muesca. En la figura 4.29 se muestra el gráfico de un Testigo y su correspondiente curva.

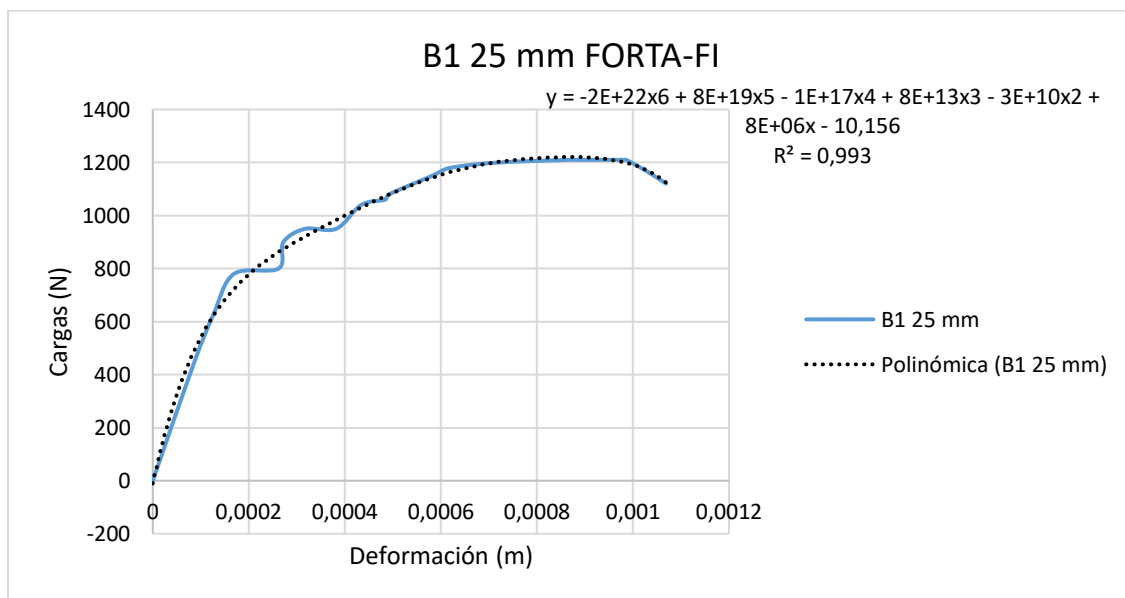


Figura 49 – Curva Esfuerzo v/s deformación por Profundidad de muesca.

Se determinó la energía de deformación para cada espécimen Semi-Circular con y sin fibra los resultados se muestran en la tabla 4.24.

Tabla 35 - Energía de deformación a la falla (J).

Con Fibra 0,05%			Sin Fibra		
Testigo	Muesca (m)	U (J)	Testigo	Muesca (m)	U (J)
A1	0,025	1,898	J1	0,025	0,430
A2	0,025	11,065	J2	0,025	11,608
B1	0,025	4,187	K1	0,025	1,178
B2	0,025	16,738	K2	0,025	4,291
C1	0,032	1,394	O1	0,032	4,190
C2	0,032	0,588	O2	0,032	1,146
D1	0,032	25,968	Q2	0,032	3,808
D2	0,032	1,183	P2	0,032	0,584
G1	0,038	3,803	L1	0,038	4,848
G2	0,038	1,545	Q1	0,038	4,063
F1	0,038	0,840	M1	0,038	3,142
F2	0,038	0,433	M2	0,038	0,753

Teniendo la energía de deformación por cada testigo se procede a determinar el promedio de la energía de deformación por profundidad de muesca, como se aprecia en la figura 4.30, el testigo con fibra tiene valores superiores lo que indica que poseen mayor capacidad de resistencia a la fractura comparada con los testigos patrón a 21°C. Ver tabla 4.25.

Tabla 365- Promedio energía de deformación por profundidad de muesca.

Con fibra		Sin fibra	
Muesca (m)	Promedio U(KJ)	Muesca (m)	Promedio U(KJ)
0,025	0,00847	0,025	0,00438
0,032	0,00728	0,032	0,00243
0,038	0,00166	0,038	0,00320

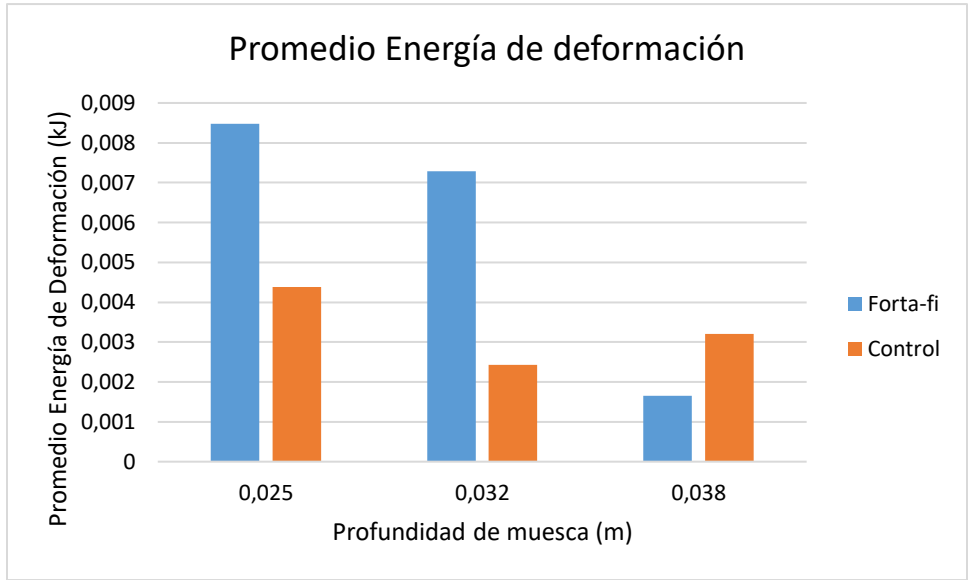


Figura 50 - Promedio energía de deformación v/s profundidad de muesca.

Se determina la pendiente de la recta de la línea de tendencia que corresponde a la variación de energía de deformación por profundidad de muesca (dU/da) en (KJ/m) según ASTM D8044-16, ver figura 4.31.

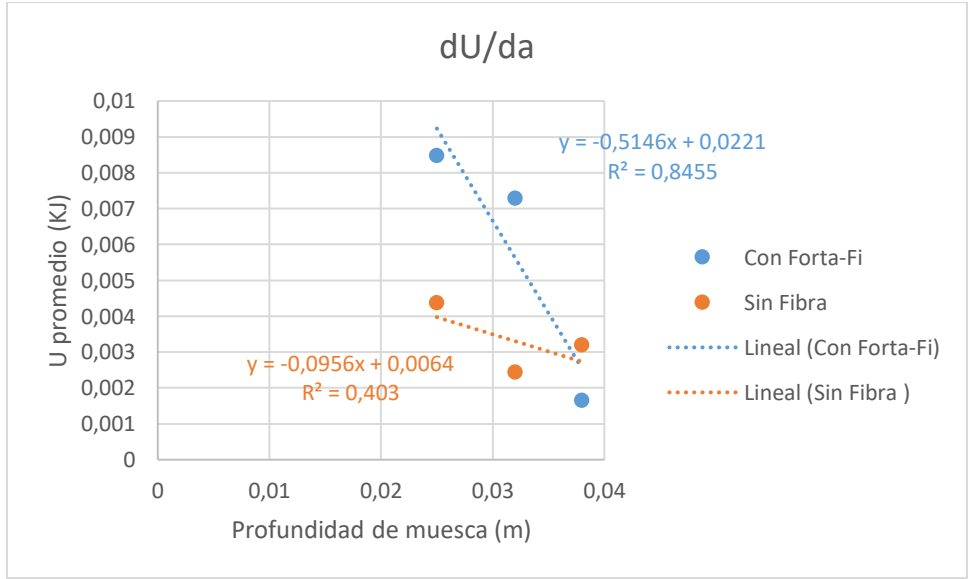


Figura 51 - Cambio energía de deformación por profundidad de muesca (KJ/m).

Según la ecuación 4.4 se determina Jc tasa de liberación de energía por profundidad de muesca (kJ/m²) para testigos con y sin fibra.

$$Jc = \frac{-1}{b} * \left(\frac{dU}{da}\right)$$

Ecuación 19 - Tasa de liberación de energía.

Donde:

b= espesor de muestra (m)

dU/da = pendiente de la recta U v/s profundidad de muesca (KJ/m).

En la tabla 4.26 se muestra los valores encontrados de Jc para testigos con y sin fibra.

Tabla 376 - Tasa de liberación de energía de deformación crítica con y sin Forta-Fi.

Con Fibra				Sin Fibra			
Espesor de Testigos Forta-Fi		(dU/da)	Jc (KJ/m ²)	Espesor de Testigos Control		(dU/da)	Jc (KJ/m ²)
e Promedio (mm)	e Promedio (m)	Pendiente	Energía de deformación	e promedio (mm)	e promedio (m)	Pendiente	Energía de deformación
58,969	-0,059	-0,515	8,727	60,261	-0,060	-0,096	1,586

Viendo los resultado del ensayo SCB se observa que los testigos con FORTA-FI tiene una tasa de liberación de energías por profundidad de muesca muy superior a sus pares sin fibra a la temperatura intermedia definida, superior en casi 5,5 veces lo que indica que posee una resistencia al agrietamientos bastante mayor, quiere decir que es un aporte el refuerzo tridimensional que nos proporciona esta fibra sintética, mejorando las propiedades de absorción de energía lo que retardaría la aparición de grietas ascendentes en recapados de mezclas asfálticas en caliente.

No está de más de mencionar que en la gráfica figura 4.30 se observa una anomalía en los testigos con la mezcla patrón. Es muy evidente que los testigos con una profundidad de mezcla 38 mm deberían tener energía de deformación inferior a los otros testigos con menor profundidad de muesca, y en este caso no lo es, el área bajo la curva de los testigos con 32 mm es inferior a la de 38 mm, esto es claro indicador que hay un error, en el ensayo de forma instrumental o en la construcción de la carpeta asfáltica de la cual proviene el testigo. Es recurrente un error en la construcción de un tramo, debido a las condiciones climáticas, diferencia de mezcla, compactación y envejecimiento de la mezcla entre otras variables. Además, en la normativa del ensayo ASTM D8044-16 se menciona un efecto de arco que podría producirse en algunos casos, alterando los resultados.

Los resultados indican que ambas mezclas, cumplen con los valores recomendados por la ASTM D8044-16, para asegurar la resistencia de las mezclas asfálticas a la fractura, valores de Jc igual o superiores a 0,5 (KJ/m²).

Capítulo 5: Análisis de Resultados

5.1 Análisis y Comparaciones

Comparación de los resultados de los ensayos y propiedades medidas en Unidad de Gestión de Calidad y Laboratorio, con áridos del río Aconcagua y mezclas asfálticas tradicionales. En un análisis más objetivo se evaluó la mezcla patrón con la dosificación recomendada por FORTA 0,05%, ya que de ésta se obtuvieron testigos de obra.

Los resultados de las probetas confeccionadas en Laboratorio se muestran en la tabla 5.1 y se destacan las mejoras más relevantes.

Tabla 38 -. Resultados Probetas.

Probetas Confeccionadas en Laboratorio		
Resultado	Mezcla Control	Con FORTA-FI
Densidad Marshall (kg/m ³)	2322,11	2327,14
Estabilidad Marshall (N)	10306,64	11223,79
Fluencia (0,01pulg)	15,23	14,71
Tracción Indirecta Saturado (kpa)	937,15	1165,68
Tracción Indirecta Seco (kpa)	687,71	856,17
Índice de Resistencia Conservada	136,27	136,15
Módulo de Rigidez (Mpa)	281,62	331,41
Módulo Resiliente (Mpa)	3214,6	3436,55
Coficiente Estructural	0,46	0,48

Descomponiendo el análisis vemos que las briquetas con fibra tienen una estabilidad Marshall levemente mayor, resistiendo más carga y manteniendo deformaciones similares a las probetas control.

El ensayo de tracción indirecta muestra que las probetas con 0,05% de FORTA-FI tienen resultados muy superiores en condición seca y saturada mejorando el comportamiento de la mezcla asfáltica.

El ensayo módulo resiliente muestra que las briquetas con fibra tienen una magnitud superior lo que indica que tienen mayor elasticidad, mejorando esta propiedad, lo que retardaría la reflexión de grietas en recapados asfálticos.



Figura 52 – Probeta ensayada a Tracción Indirecta con y sin FORTA-FI.

En la figura 5.1 se observa los resultados del ensayo a tracción indirecta, al lado izquierdo tenemos una probeta con fibra y al lado derecho una sin fibra, comparando visualmente ambas probetas se observa que la sin fibra tiene una fisura mucho más notoria que la elaborada con FORTA-FI, mostrando que el refuerzo tridimensional aumenta la cohesión y resistencia a fisuración de las mezclas asfálticas.

En la siguiente tabla 5.1 se muestran los resultados del ensayo SCB a testigos de obra con y sin fibra.

Tabla 39 - Resultados Testigos con y sin fibra.

Testigos de Obra		
Resultado	Mezcla Control	Con FORTA-FI
Densidad Marshall (kg/m ³)	2275,26	2272,93
Energía de Deformación 25 mm (KJ)	0,00437	0,00847
Energía de Deformación 32 mm (KJ)	0,00243	0,00728
Energía de Deformación 38 mm (KJ)	0,0032	0,00165
Cambio de Energía de Deformación (KJ/m)	0,095	0,514
Tasa de Liberación de Energía (KJ/m ²)	1,613	8,727

Como se observa los testigos con fibra muestran una mayor tasa de liberación de energía de deformación crítica mejorando las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica tradicional en recapados, haciéndola más resistente al agrietamiento a temperatura intermedia.

La evaluación de la energía de deformación (energía disipada) es una forma efectiva de medir la resistencia a la fisuración en las mezclas asfálticas, a mayor cantidad de energía disipada superior será el desempeño, durabilidad y resistencia a fisuración de las mezclas para recapados asfálticos.

5.2 Conclusiones y Recomendaciones

Con los recursos disponibles por la Unidad de Gestión de Calidad y Laboratorio de la Región de Valparaíso del M.O.P. y lo observado en los distintos ensayos realizados en este laboratorio se puede presentar las siguientes conclusiones.

La adición de la fibra sintética FORTA-FI no afecta de forma negativa las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas para recapado con áridos del río Aconcagua y mezclas asfálticas tradicionales. Utilizando el Manual de Carreteras y las recomendaciones de los métodos de diseño AASHTO se puede afirmar que la incorporación de FORTA-FI no perjudica las propiedades mecánicas y cumple con las normativas nacionales especificadas en el Manual de Carreteras.

Al comparar en el Laboratorio regional el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente, con y sin fibra sintética FORTA-FI, con áridos del río Aconcagua y mezclas asfálticas tradicionales para recapados asfálticos, se observa que la adición de fibra mejoró las propiedades de las probetas y testigos. Bajo las mismas condiciones y variables de evolución las mezclas con fibra sintética obtuvieron resultados superiores prácticamente en todos los casos en comparación a la mezcla control.

Estudiando las mejoras que provoca FORTA-FI a las probetas y testigos fabricados con áridos del río Aconcagua y mezclas asfálticas tradicionales utilizadas en la fabricación de recapados, se puede señalar que el refuerzo tridimensional que entrega esta fibra sintética a los recapados postergará la aparición de fisuras por reflexión.

Los resultados obtenidos en el ensayo a fisuración muestran que las mezclas con fibra poseen una resistencia al agrietamiento muy superiores a las mezclas control, haciendo la mezcla asfáltica más rígida y con una mayor capacidad de absorción de energía de deformación por metro cuadrado.

Además, en el ensayo Marshall mejora la estabilidad de la mezcla lo que refleja una mayor resistencia a las cargas impuestas por el tránsito vehicular.

Comparando los resultados obtenidos en laboratorio observamos que FORTA-FI mejora las propiedades de las mezclas asfálticas en condiciones de ambientes más saturados, en consecuencia, es un aporte a los recapados que se construyen en ambientes más húmedos y mejora sus capacidades de resistencia a la tracción retenida lo que ayuda al retardo de la aparición de grietas ascendentes en condiciones húmedas.

Según los resultados de las mezclas con y sin fibra se recomienda, en caso que el diseño del recapado arroje espesores muy grandes, utilizar FORTA-FI para disminuir el espesor de capas en base a los valores de coeficientes obtenidos de módulo, estabilidad, fluencia y capacidad de resistencia al agrietamiento superiores a las mezclas sin fibra sintética.

Se sugiere por lo observado en Laboratorio, controlar la incorporación de la fibra a la mezcla asfáltica en caliente, ya que se debe distribuir de forma homogénea, esto resulto muy difícil en las experiencias realizadas en la Unidad de Gestión de Calidad y Laboratorio y pese a seguir las recomendaciones de Pre-dispersión de fibra indicadas por la metodología mencionada, se observaron muchas aglomeraciones.

Se recomienda evaluar las dosificaciones propuestas 0,025 y 0,075 en mezcla suelta y testigos de obra realizando el ensayo SCB para medir la tasa de liberación de energía de deformación crítica (Jc). Además, se aconseja evaluar todas las dosificaciones de FORTA-FI en laboratorio, elaborando probetas asfálticas en el compactador giratorio de 150 mm de diámetro, y realizar el ensayo SCB para medir la resistencia a la fractura.

Se aconseja variar la temperatura de ensayo, quizás utilizando temperatura más extrema 0°C o 60°C como en el ensayo Marshall, para obtener valores de Jc y evaluar el aporte del refuerzo tridimensional, y las mejoras en los recapados.

Se sugiera variar el porcentaje de asfalto para encontrar un valor óptimo de porcentaje de asfalto y fibra con el fin de estimar los costos, además, se recomienda medir el nivel de vacíos de aire y V.A.M en una mezcla con fibra, para verificar que esté en el rango exigido por el Manual de Carreteras.

En conclusión, según la evaluación hecha en el Laboratorio Regional con sus recursos, se aprecia que el refuerzo tridimensional que aporta FORTA-FI a las mezclas asfáltica es efectivo, lo que se observa comparando las mezclas con y sin fibra, que mejoran las propiedades mecánicas haciendo más duraderos los recapados asfálticos retardando la aparición de fisuras reflejas en recapados con mezclas asfálticas tradicionales y áridos del río Aconcagua.

Referencias

- [1] J. Bock Pantoja, "Evaluación del comportamiento a largo plazo de mezclas asfálticas producidas con escoria de cobre como árido", Proyecto de Título, Ingeniería Civil, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile, 2016.
- [2] Organización Mundial de la Salud, "Datos sobre la seguridad vial en el mundo", 2017. [En línea]. Available: <https://www.who.int/features/factfiles/roadsafety/es/>.
- [3] Canal 13, "El largo proceso para reparar los hoyos de las calles de Santiago", 2015. [En línea]. Available: <https://www.t13.cl/noticia/nacional/el-largo-proceso-reparar-hoyos-calles-santiago>.
- [4] Academia, "Fallas en Pavimentos Flexibles", 2019, [En línea]. Available: [https://www.academia.edu/9917229/4.-Fallas en pavimentos flexibles](https://www.academia.edu/9917229/4.-Fallas_en_pavimentos_flexibles).
- [5] G. Valdés Vidal, F. Pérez Jiménez y A. Calabi Floody, "La fisuración en pavimentos asfálticos y sus mecanismos de deterioro", *Revista Científico Tecnológica Departamento Ingeniería de Obras Civiles RIOC*, vol. 1, n° ISSN 0719-0514, pp. 26-36, 2012.
- [6] Sustainable Infrastructure Solutions S.A.S. (SiSOL), "Refuerzos de Vías", 2019, [En línea]. Available: <http://es-sisol.weebly.com/refuerzo-de-viacuteas.html>.
- [7] C. M. Whar Daniel, "Desarrollo de materiales para recapado asfáltico utilizados en la rehabilitación de pavimentos deteriorados", Investigación, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, 2010.
- [8] Abertis Autopistas, C. Asfalcura y U. Federico Santa María, "*Desarrollo de materiales para recapados asfálticos utilizados en rehabilitación de pavimentos deteriorados*", *II Concurso de Proyectos de Equipamiento Científico Tecnológico*, Valparaíso, Chile, 2013.
- [9] Folleto: "*FORTA-FI Tecnología de Refuerzo con Fibras para Mezclas Asfálticas*", HES FORTA-FI, FORTA CORPORATION, Quebec, Canada, p. 4, 2014.
- [10] J. E. Martínez Oliveros, Predicción de Fallas por Escalonamiento en las Estructuras de Pavimento Rígido Propuestas Dentro del Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito de Invias, Empleando el Modelo de Deterioro de Pavimentos Rígidos NAPCOM, Especialización en Ingeniería de Pavimentos, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2018.
- [11] A. Becerril Valencia y D. I. Miranda Becerril, "Procedimiento Constructivo de Pavimentos Flexibles en la Carretera: Barraca Larga en el Estado de Oaxaca", Tesis, Ingeniería Civil, Universidad Nacional Autónoma de México, Oaxaca, México, 2016.
- [12] Laboratorio Nacional de Vialidad, Curso Laboratorista Vial, Mezclas Asfálticas, vol. V.
- [13] R. Zúñiga, "Mezcla Asfáltica en Caliente", Curso Laboratorista Vial C, Sub-Departamento Tecnológico y Materiales, Laboratorio Nacional de Vialidad, M.O.P., 2015.
- [14] R. J. Miranda Rebolledo, "Deterioro en Pavimentos Flexibles Y Rígidos", Tesis, Ingeniero Constructor, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, 2010.
- [15] J. Vera Silva, "Caracterización de Mezclas Asfálticas por su Resistencia a Fatiga por Reflexión", Magister en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2012.

- [16] QUASCO resonant pavement breakers, "Información Técnica", 2019. [En línea]. Available: <https://www.rubblization.com/es/informacin-tecnica.html>.
- [17] Dirección de Vialidad, Manual de Carreteras, vol. 7, Mantenimiento Vial, M.O.P., 2017.
- [18] G. Valdés, R. Botella y F. Pérez-Jiménez, "Ensayo Fénix, una Nueva Metodología para Medir la Resistencia a la Fisuración en Mezclas Asfálticas", *Revista de la Construcción*, vol. 8, nº 1, pp. 114-125, 2009.
- [19] Copyright ASTM International, "Standard Test Method for Evaluation of Asphalt Mixture Cracking Resistance using the Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures", nº D8044-16, 2016.
- [20] M. Jiménez Acuña, "Overlay Tester: Equipo de laboratorio para evaluar la resistencia al agrietamiento en mezclas asfálticas", *Métodos y Materiales*, vol. 3, pp. 29-43, 2013.
- [21] Laboratorio Nacional de Vialidad, Curso de Laboratorista Vial, Ligantes Asfálticos y Sellos de Junta, vol. IV.
- [22] F. A. Wulf Rodríguez, "Análisis de Pavimento Asfáltico Modificado con Polímero, Tesis, Ingeniero Constructor, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, 2008.
- [23] Dirección de Vialidad, Manual de Carreteras, vol. 8, Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control, M.O.P., 2017.
- [24] N. I. Ramírez Palma, "Estudio de la Utilización de Caucho de Neumáticos en Mezclas Asfálticas en Caliente Mediante Proceso Seco", Memoria de Título, Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2006.
- [25] Forta Corporation, "Forta Asphalt Fiber", 2019, [En línea]. Available: <http://www.forta-fi.com/>.
- [26] K. E. Kaloush, K. P. Biligiri, W. A. Zeiada, M. C. Rodezno y J. X. Reed, "Evaluation of Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Material Characterization Tests", *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 38, nº 4, 2010.
- [27] W. Zeiada y S. Underwood, "Effect of Using FORTA Fibers in Base Asphalt Layers to Mitigate Bottom-Up Fatigue Cracking", FORTA Corporation, Arizona State University, School of Sustainable Engineering and the Built Environment Department of Civil, Environmental, and Sustainable Engineering, Tempe, Arizona, 2014.
- [28] Dirección de Vialidad, Manual de Carreteras, vol. 3, Instrucciones y Criterios de Diseño, M.O.P., 2017.
- [29] Dirección de Vialidad, Manual de Carreteras, vol. 5, Especificaciones Técnicas Generales de Construcción, M.O.P., 2017.
- [30] UNE-EN, "Rigidez Anexo C, Ensayo Tracción Indirecta sobre Probetas Cilíndricas (IT-CY), número 12697-26, 2012.
- [31] "Refuerzo de Mezclas Asfálticas con Fibra; Pre-dispesión de fibras en laboratorio y producción de una muestra de mezcla asfáltica con Forta-Fi, Centro nacional de excelencia para innovaciones inteligente, Universidad Estatal de Arizona.

Capítulo 6: Anexos

6.1 Anexo 1: Trabajo en Laboratorio

Características y propiedades de algunas probetas confeccionadas en Laboratorio, alturas (h), pesos, absorción (A_{ab} %), densidad (G), etc.

Probetas Control.

Tabla 40- Densidad Marshall Probetas Control.

Densidad Marshall Probetas Control Método B											
Probetas	h1	h2	h3	h4	h promedio	Factor	Peso seco (gr)	Peso Saturado (gr)	Peso SSS (gr)	Aab %	G (Kg/m ³)
1	62,9	62,7	62,7	62,9	62,8	1,019	1139,9	651,8	1144,9	1,014	2311,701
2	60,7	61	60,7	60,9	60,825	1,078	1140,5	654,3	1144,6	0,836	2326,127
3	62,2	62,3	62,1	61,9	62,125	1,037	1143,3	656	1147	0,754	2328,513

Tabla 41- Tracción Indirecta Probetas Control en Condición Saturada.

Tracción Indirecta Probetas Control en Condición Saturada Método Geometrico											
Probetas	h1	h2	h3	h4	h promedio	Diametro (mm)	Peso seco (gr)	Area en (m ²)	Volumen en (m ³)	Masa en (kg)	Densidad en (kg/m ³)
1	61,2	61,4	61,2	61,6	61,35	101,6	1137,6	0,00811	0,00050	1,138	2287,166
2	61,6	61,5	62,1	62,4	61,9	101,6	1143,5	0,00811	0,00050	1,144	2278,601
3	62,6	62,9	62,6	62,3	62,6	101,6	1139,7	0,00811	0,00051	1,140	2245,634

Tabla 42- Tracción Indirecta Probetas Control en Condición Seca.

Tracción Indirecta Probetas Control en Condición Seca Método Geometrico											
Probetas	h1	h2	h3	h4	h promedio	Diametro (mm)	Peso seco (gr)	Area en (m ²)	Volumen en (m ³)	Masa en (kg)	Densidad en (kg/m ³)
4	62,8	62,5	62,9	63	62,8	101,6	1139,2	0,00811	0,00051	1,139	2237,500
5	62,6	62,6	62,8	62,9	62,725	101,6	1140,6	0,00811	0,00051	1,141	2242,928
6	61,9	61,6	61,3	61,5	61,575	101,6	1139	0,00811	0,00050	1,139	2281,613

Probetas con 0,025% de FORTA-FI.

Tabla 43 - Densidad Marshall Probetas 0,025 % FORTA-FI.

Densidad Marshall Probetas 0,025 % FORTA-FI Método B											
Probetas	h1	h2	h3	h4	h promedio	Factor	Peso seco (gr)	Peso Saturado (gr)	Peso SSS (gr)	Aab %	G (Kg/m ³)
1	60	60,1	60,3	60	60,1	1,099	1139,6	656,2	1141,4	0,371	2348,722
2	62,1	61,8	61,4	61,8	61,775	1,046	1135,7	653,9	1139,3	0,742	2339,720
3	62,2	61,9	61,9	62,1	62,025	1,04	1140,4	654,7	1143	0,532	2335,450

Tabla 44 - Tracción Indirecta 0,025% FORTA-FI Probetas en Condición Saturada.

Tracción Indirecta 0,025% FORTA-FI Probetas en Condición Saturada Método Geometrico											
Probetas	h1	h2	h3	h4	h promedio	Diametro (mm)	Peso seco (gr)	Area en (m ²)	Volumen en (m ³)	Masa en (kg)	Densidad en (kg/m ³)
1	61,6	61,1	60,9	61,1	61,175	101,6	1141,1	0,00811	0,00050	1,141	2300,766
2	61,6	61,6	61,1	61,5	61,45	101,6	1139,3	0,00811	0,00050	1,139	2286,856
3	62,2	62,1	61,9	61,9	62,025	101,6	1140,5	0,00811	0,00050	1,141	2268,043

Tabla 45 - Tracción Indirecta 0,025% FORTA-FI Probetas en Condición Seca.

Tracción Indirecta 0,025% FORTA-FI Probetas en Condición Seca Método Geometrico											
Probetas	h1	h2	h3	h4	h promedio	Diametro (mm)	Peso seco (gr)	Area en (m ²)	Volumen en (m ³)	Masa en (kg)	Densidad en (kg/m ³)
4	61,6	61,3	61,6	61,8	61,575	101,6	1138,9	0,00811	0,00050	1,139	2281,413
5	61	61,4	61,2	61,2	61,2	101,6	1136,5	0,00811	0,00050	1,137	2290,555
6	61	61,1	60,8	61,3	61,05	101,6	1139,8	0,00811	0,00049	1,140	2302,850

Probetas con 0,05% de FORTA-FI.

Tabla 46 - Densidad Marshall Probetas 0,05 % FORTA-FI.

Densidad Marshall Probetas 0,05 % FORTA-FI Método B											
Probetas	h1	h2	h3	h4	h promedio	Factor	Peso seco (gr)	Peso Saturado (gr)	Peso SSS (gr)	Aab %	G (Kg/m ³)
1	62,2	62,2	62,4	62,1	62,225	1,035	1142,6	655,1	1145	0,490	2332,313
2	61	61,2	61,6	61,5	61,325	1,062	1141,5	652,7	1144,7	0,650	2320,122
3	62,5	62,1	62,2	62,7	62,375	1,029	1141,2	654,5	1144,5	0,673	2328,980

Tabla 47 - Tracción Indirecta 0,05% FORTA-FI Probetas en Condición Saturada.

Tracción Indirecta 0,05% FORTA-FI Probetas en Condición Saturada Método Geométrico											
Probetas	h1	h2	h3	h4	h promedio	Diametro (mm)	Peso seco (gr)	Area en (m ²)	Volumen en (m ³)	Masa en (kg)	Densidad en (kg/m ³)
1	62,5	62,6	62,4	62,3	62,45	101,6	1143	0,00811	0,00051	1,143	2257,545
2	62,8	63	63,1	62,9	62,95	101,6	1140,1	0,00811	0,00051	1,140	2233,932
3	60,5	60,8	61,1	61,1	60,875	101,6	1137,9	0,00811	0,00049	1,138	2305,621

Tabla 48 - Tracción Indirecta 0,05% FORTA-FI Probetas en Condición Seca.

Tracción Indirecta 0,05% FORTA-FI Probetas en Condición Seca Método Geométrico											
Probetas	h1	h2	h3	h4	h promedio	Diametro (mm)	Peso seco (gr)	Area en (m ²)	Volumen en (m ³)	Masa en (kg)	Densidad en (kg/m ³)
4	62	62,3	62,4	62	62,175	101,6	1141,9	0,00811	0,00050	1,142	2265,348
5	60,5	60,5	60,3	60,6	60,475	101,6	1141,9	0,00811	0,00049	1,142	2329,029
6	61,7	61,6	61,2	61,5	61,5	101,6	1141,9	0,00811	0,00050	1,142	2290,212

Probetas con 0,075% de FORTA-FI.

Tabla 49 - Densidad Marshall Probetas 0,075 % FORTA-FI.

Densidad Marshall Probetas 0,075 % FORTA-FI Método B											
Probetas	h1	h2	h3	h4	h promedio	Factor	Peso seco (gr)	Peso Saturado (gr)	Peso SSS (gr)	Aab %	G (Kg/m ³)
1	61,9	61,6	61,3	61,6	61,6	1,053	1138,8	656,1	1140,3	0,310	2351,921
2	63,8	64,1	64	63,8	63,925	0,99	1139,9	649,5	1147,8	1,585	2287,578
3	62,2	61,9	61,9	62,1	62,025	1,04	1140,4	654,7	1143	0,532	2335,450

Tabla 50 - Tracción Indirecta 0,075% FORTA-FI Probetas en Condición Saturada.

Tracción Indirecta 0,075% FORTA-FI Probetas en Condición Saturada Método Geometrico											
Probetas	h1	h2	h3	h4	h promedio	Diametro (mm)	Peso seco (gr)	Area en (m ²)	Volumen en (m ³)	Masa en (kg)	Densidad en (kg/m ³)
1	62,2	61,7	61,7	62,1	61,925	101,6	1139,6	0,00811	0,00050	1,140	2269,913
2	60,8	61	60,7	60,5	60,75	101,6	1138,5	0,00811	0,00049	1,139	2311,583
3	62	62,5	62,4	62	62,225	101,6	1139,9	0,00811	0,00050	1,140	2259,564

Tabla 51 - Tracción Indirecta 0,075% FORTA-FI Probetas en Condición Seca.

Tracción Indirecta 0,075% FORTA-FI Probetas en Condición Seca Método Geometrico											
Probetas	h1	h2	h3	h4	h promedio	Diametro (mm)	Peso seco (gr)	Area en (m ²)	Volumen en (m ³)	Masa en (kg)	Densidad en (kg/m ³)
4	62,6	62,5	62,3	62,3	62,425	101,6	1141,3	0,00811	0,00051	1,141	2255,090
5	62,5	62,4	62	62	62,225	101,6	1141,2	0,00811	0,00050	1,141	2262,140
6	61,7	61,7	61,5	61,4	61,575	101,6	1142	0,00811	0,00050	1,142	2287,623



Figura 53 - Tamizado.



Figura 54- 1100 de agregado mineral.



Figura 55 - Mezcla en laboratorio.



Figura 56 - Probetas Confeccionadas en laboratorio.



Figura 57 - Pasado de probetas.

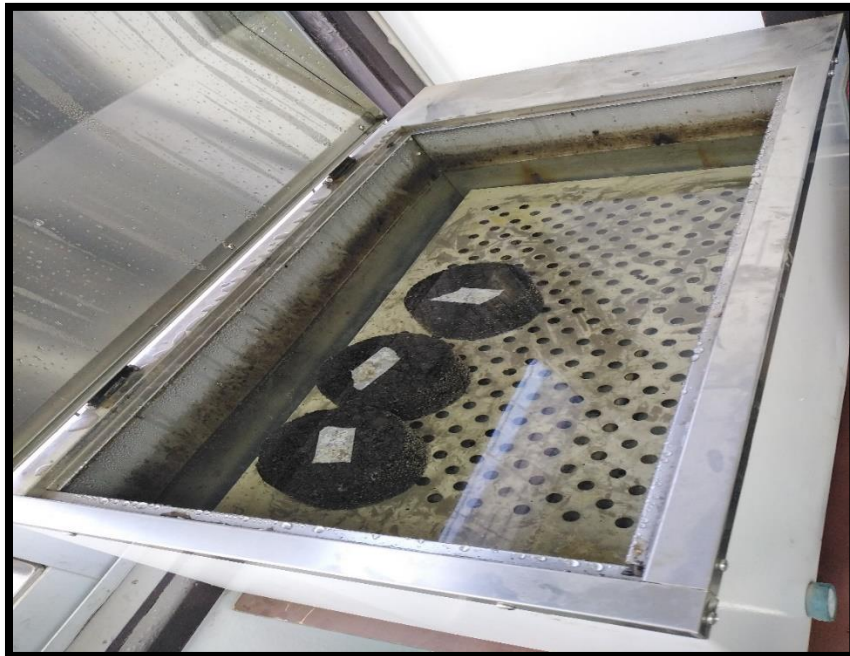


Figura 58 - Marlotia baño de agua



Figura 59 - Ensayo Marshall.

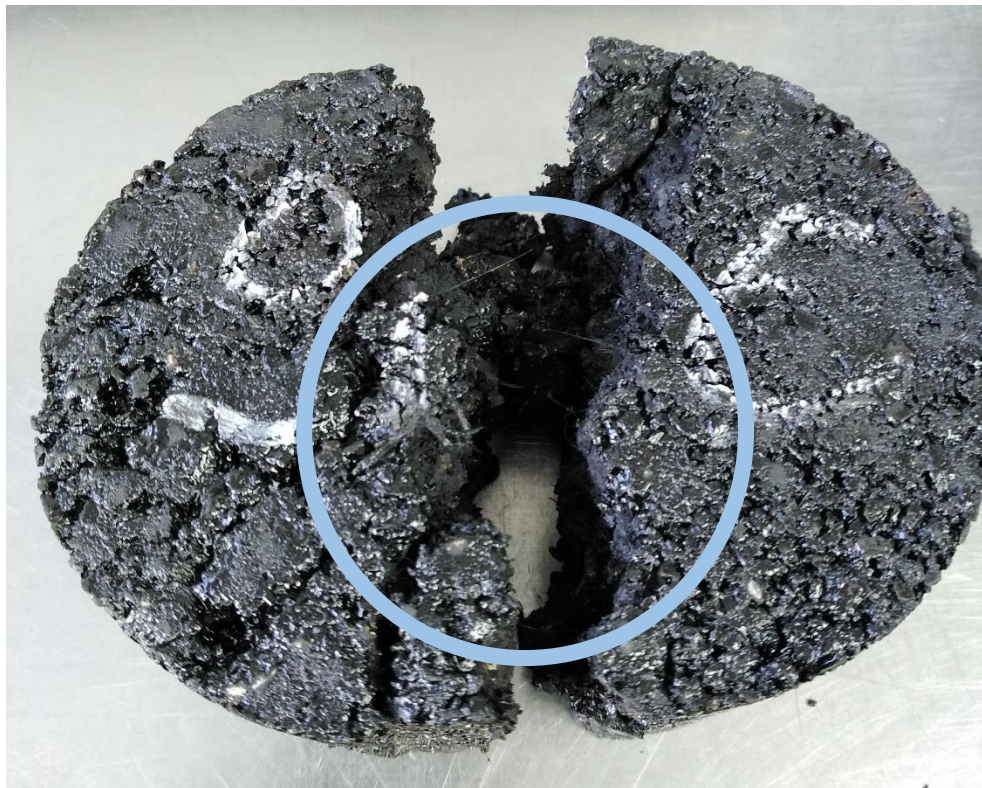


Figura 60 – Fibra en briqueta.



Figura 61 - Ensayo Tracción Indirecta.



Figura 62 - Probeta ensayada.



Figura 63 - Falla profeta.



Figura 64 - Testigos de Obra.



Figura 65 - Aserrado testigos.



Figura 66 - Ensayo SCB.

