



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

CONFECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE TRAMOS DE PRUEBA DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS CON INCORPORACIÓN DE POLVO DE CAUCHO NACIONAL DE
NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU) MEDIANTE VÍA SECA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

NICOLE MICHELLE NAVARRO DUPRÉ

PROFESOR GUÍA:
GABRIELA MUÑOZ ROJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DAVID CAMPUSANO BROWN
FEDERICO DELFÍN ARIZTIA

SANTIAGO DE CHILE
AÑO 2013

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TITULO DE: Ingeniero Civil
POR: Nicole Navarro Dupré
FECHA: 04/10/2013
PROFESOR GUIA: Gabriela Muñoz Rojas**

**CONFECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE TRAMOS DE PRUEBA DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS CON INCORPORACIÓN DE POLVO DE CAUCHO NACIONAL DE
NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU) MEDIANTE VÍA SECA**

El presente trabajo contempla la confección y el seguimiento de dos Tramos de Prueba, a realizarse por primera vez en el país, con capas de rodadura fabricadas con mezclas asfálticas en caliente modificadas con polvo de caucho obtenido de neumáticos fuera de uso (NFU). El caucho es incorporado a la mezcla por vía seca; como una fracción fina de áridos, y su origen es una planta nacional de reciclaje. Con estos tramos se pretende caracterizar las mezclas asfálticas modificadas por vía seca, lo que permitirá proponer normativas de confección y colocación para la Dirección de Vialidad, especialmente dentro del Manual de Carreteras.

En el proceso por vía seca, el caucho interacciona con el asfalto en un proceso denominado digestión, en el que se modifica la reología y viscosidad del ligante. El procedimiento de diseño difiere al de una mezcla asfáltica convencional, ya que se requiere la realización de ensayos adicionales para determinar el tiempo y la temperatura de digestión mínimos para alcanzar el grado de modificación suficiente (en el ligante) que provea a la mezcla de mejores propiedades mecánicas. Estas se deben verificar en Obra.

Finalmente, de los resultados obtenidos, la utilización del polvo de caucho como material para pavimentos asfálticos se plantea como una solución ambiental viable para dar un valor agregado adicional al caucho de NFU y que permite, de una manera más económica que los asfaltos con polímero y a un precio relativamente competitivo, aportar ventajas técnicas a la carretera. En efecto, respecto a las mezclas asfálticas convencionales, se obtiene una mayor resistencia a los cambios térmicos, a la disgregación (menor susceptibilidad a la humedad), al ahuellamiento y al envejecimiento. Además, como capa superficial provee al pavimento de una mayor capacidad estructural y de una mayor resistencia al deslizamiento (adherencia).

De esta manera, la tecnología por vía seca es accesible a las Empresas fabricantes de mezclas asfálticas. No obstante, las mezclas modificadas por esta vía necesitan procedimientos específicos de diseño, fabricación y condiciones controladas de ejecución (extremar el control de temperaturas), por lo que precisan Empresas adiestradas y de un control de calidad riguroso.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mis agradecimientos al Laboratorio Nacional de Vialidad, por permitirme realizar esta investigación y proporcionarme los equipos y materiales necesarios, y además a todos sus integrantes: miembros del Área de Asfalto, Área de Hormigón, Área de Geotecnia, Subdepartamento Auscultaciones y Prospecciones, Área de Química, Área de Recursos Humanos, Subdepartamento de Perfeccionamiento Técnico y Acreditación, Conductores, personal de Seguridad y personal del Casino, por el apoyo técnico, logístico y profesional brindados.

De igual manera, quiero agradecer al Centro de Desarrollo e Investigación (CDI) de Bitumix, a Pavimentos Quilín y a Ferrovial Chile S.A., por su apoyo técnico y préstamo de equipos, y en particular a los Laboratoristas de cada una de estas Empresas, cuya colaboración y buena disposición resultaron significativas e imprescindibles.

De forma muy especial y sincera, deseo brindar también mis reconocimientos a las personas que activamente participaron en esta Memoria; a mi profesora guía, Sra. Gabriela Muñoz Rojas; quien me dio la oportunidad, la confianza y el privilegio de realizar este trabajo. Millones de gracias por sus enseñanzas, excelente disposición pero por sobre todo por su inagotable apoyo, comprensión y cariño. Asimismo, a Don Aníbal Meza Navia, mi otro “profesor guía”, por su enorme sabiduría, paciencia y buena voluntad. Sin vuestra entrega y colaboración, sin dudas no lo hubiera logrado.

Por último, expresar mi gratitud a mis compañeros de Laboratorio, por brindarme su amistad y colaboración y hacer de esta experiencia algo muy grato e inolvidable: a los miembros del Laboratorio de Asfalto, que me ayudaron siempre, de manera incondicional, y con la mayor de las buenas voluntades; a los integrantes del Laboratorio Regional Metropolitano, mis principales apoyos desde el primer día, muchas gracias por la gran ayuda y cariñosa acogida brindadas; y a mis compañeros memoristas, Andrea Peñaloza y Camilo Jorquera, por acompañarme y animarme durante esta larga travesía.

Quiero también aprovechar de agradecer muy especialmente a mis padres, hermanos y abuelas; pilares incondicionales y fundamentales en cada una de las etapas de mi vida, que me dan han dado la fortaleza y herramientas necesarias para salir adelante. No hay forma de retribuir toda la comprensión y el enorme esfuerzo que han realizado. Este trabajo ha sido por y para Ustedes.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN DE LA MEMORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
TABLA DE CONTENIDO.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivos generales.....	4
1.2.2. Objetivos específicos	5
1.3. Metodología	5
1.4. Antecedentes generales: Situación nacional.....	9

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Mezclas asfálticas	13
2.1.1. Mezclas asfálticas en caliente	13
2.1.1.1. Áridos	14
2.1.1.2. Cemento asfáltico tradicional	15
2.1.1.2.1. Propiedades químicas.....	15
2.1.1.2.2. Propiedades físicas	16
2.1.1.3. Cemento asfáltico modificado con polímeros.....	17
2.2. Mezclas asfálticas en caliente con incorporación de polvo de caucho de neumáticos fuera de uso (NFU)	18
2.2.1. Polvo de caucho.....	18
2.2.1.1. Neumáticos fuera de uso (NFU).....	18
2.2.1.2. Obtención del polvo de caucho	20
2.2.1.3. Técnicas de incorporación en mezclas asfálticas	23
2.2.1.3.1. Proceso por Vía Húmeda	23
2.2.1.3.2. Proceso por Vía Seca	25
2.2.1.4. Ventajas técnicas	27
2.2.1.5. Ventajas ambientales	28
2.2.1.6. Propiedades físicas y químicas del polvo de caucho	29
2.3. Propiedades de las mezclas asfálticas.....	30

CAPÍTULO 3	
MÉTODOS DE ENSAYE Y CONTROL	33
3.1. Trabajo en Laboratorio	33
3.1.1. Materiales constituyentes	33
3.1.1.1. Áridos	33
3.1.1.2. Cemento asfáltico	34
3.1.1.3. Polvo de caucho	35
3.1.2. Diseño de mezclas asfálticas en caliente	36
3.1.2.1. Mezclas asfálticas convencionales	36
3.1.2.2. Mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho por vía seca	39
3.1.2.2.1. Procedimiento para la confección de probetas	40
3.1.2.2.2. Ensayo de Inmersión – Compresión	41
3.1.2.2.3. Ensayo de Sensibilidad al agua	43
3.1.3. Caracterización de mezclas asfálticas	46
3.1.3.1. Módulo Resiliente por compresión diametral	46
3.1.3.2. Resistencia a Tracción indirecta (compresión diametral)	48
3.1.3.2.1. Ensayo según UNE-EN 12697-23	48
3.1.3.2.2. Ensayo según NLT-346	49
3.1.3.3. Ensayo de Ahuellamiento bajo agua	49
3.2. Trabajo en Terreno	52
3.2.1. Controles receptivos a la mezcla asfáltica	52
3.2.1.1. Densidad máxima de la mezcla (DMM)	52
3.2.1.2. Contenido de asfalto	52
3.2.1.3. Granulometría	54
3.2.2. Controles receptivos a la unidad terminada	54
3.2.2.1. Compactación y espesor a partir de testigos	54
3.2.2.1.1. Compactación de una capa asfáltica	54
3.2.2.1.2. Espesor de una capa asfáltica	55
3.2.2.2. Medición de deflexiones mediante el Deflectómetro de Impacto	55
3.2.2.3. Regularidad superficial (IRI)	56
3.2.2.4. Ahuellamiento	58
3.2.2.5. Resistencia al deslizamiento del pavimento	59
3.2.2.5.1. Macrotextura mediante ensaye del círculo de arena	59
3.2.2.5.2. Macrotextura mediante perfilometría laser	60
3.2.2.5.3. Coeficiente de fricción transversal con SCRIM	60
3.2.2.5.4. Coeficiente de fricción con el péndulo británico TRRL	61
 CAPÍTULO 4	
CONFECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE TRAMOS DE PRUEBA	63
4.1. Tramo de Prueba I (Ruta G –184, Km 0.077- Km 0.502)	63
4.1.1. Mezcla asfáltica tradicional	66
4.1.1.1. Dosificación de diseño y Fórmula de trabajo	66
4.1.1.2. Caracterización y Control de calidad de materiales componentes	67
4.1.1.2.1. Agregados pétreos	67
4.1.1.2.2. Cemento asfáltico	69

4.1.1.2.3.	Visación de la mezcla asfáltica tradicional	70
4.1.2.	Diseño de la mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho por vía seca.....	71
4.1.2.1.	Polvo de caucho.....	72
4.1.2.2.	Determinación de las condiciones de digestión	73
4.1.2.3.	Análisis Marshall	78
4.1.2.4.	Fórmula de trabajo	79
4.1.2.5.	Verificación del diseño	80
4.1.2.5.1.	Módulo Resiliente a 15°C y 25°C	81
4.1.2.5.2.	Resistencia a Compresión Diametral	82
4.1.2.5.3.	Ahuellamiento bajo agua a 50°C.....	83
4.1.3.	Confección de la capa asfáltica de rodadura en el Tramo de Prueba	86
4.1.3.1.	Fabricación en Planta y colocación en terreno.....	86
4.1.3.2.	Antecedentes	89
4.1.3.2.1.	Control de temperaturas en el Tramo de Prueba	89
4.1.3.2.2.	Singularidades	91
4.1.4.	Controles Receptivos	91
4.1.4.1.	Controles a mezclas asfálticas.....	93
4.1.4.1.1.	Control del Contenido de asfalto	93
4.1.4.1.1.1.	Mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho.....	93
4.1.4.1.2.	Control de la Densidad máxima de la mezcla (DMM)	97
4.1.4.1.2.1.	Mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho.....	97
4.1.4.2.	Controles al pavimento terminado.....	98
4.1.4.2.1.	Controles a Testigos	98
4.1.4.2.1.1.	Control de la Compactación	99
4.1.4.2.1.2.	Control del Espesor.....	102
4.1.4.2.1.3.	Control del Módulo Resiliente	103
4.1.4.2.2.	Control de la Deflexión	105
4.1.4.2.3.	Control de la Rugosidad (IRI).....	110
4.1.4.2.4.	Control del Ahuellamiento	115
4.1.4.2.5.	Control del Coeficiente de fricción transversal (SCRIM)	119
4.1.4.2.6.	Control de la Macrotextura por ensaye del círculo de arena	125
4.1.4.2.7.	Control de la Macrotextura con método perfilométrico	126
4.1.5.	Resumen.....	129
4.2.	Tramo de Prueba II (Ruta F – 50, Km 19.300 - Km 19.800).....	130
4.2.1.	Mezcla asfáltica tradicional	131
4.2.1.1.	Dosificación de diseño y Fórmula de trabajo.....	131
4.2.1.2.	Caracterización y Control de calidad de materiales componentes	132
4.2.1.2.1.	Agregados pétreos.....	133
4.2.1.2.2.	Cemento asfáltico.....	134
4.2.1.2.3.	Visación de la mezcla asfáltica tradicional	134
4.2.2.	Diseño de la mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho por vía seca.....	135
4.2.2.1.	Polvo de caucho.....	135
4.2.2.2.	Determinación de las condiciones de digestión	136
4.2.2.3.	Análisis Marshall	139
4.2.2.4.	Fórmula de trabajo	140

4.2.2.5.	Verificación del diseño	141
4.2.2.5.1.	Módulo Resiliente a 15°C y 25°C	142
4.2.2.5.2.	Resistencia a Tracción indirecta a 15°C.....	143
4.2.2.5.3.	Ahuellamiento bajo agua a 50°C.....	144
4.2.3.	Confección de la capa asfáltica de rodadura en el Tramo de Prueba	146
4.2.3.1.	Fabricación en Planta y colocación en terreno.....	146
4.2.3.2.	Antecedentes	149
4.2.3.2.1.	Control de temperaturas en Tramo de Prueba.....	149
4.2.4.	Controles Receptivos	150
4.2.4.1.	Controles a mezclas asfálticas.....	150
4.2.4.1.1.	Control del Contenido de asfalto	151
4.2.4.1.1.1.	Mezcla asfáltica tradicional	151
4.2.4.1.1.2.	Mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho.....	152
4.2.4.1.2.	Control de la Granulometría	154
4.2.4.1.2.1.	Mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho.....	154
4.2.4.1.3.	Control de la Densidad Máxima de la Mezcla (DMM)	155
4.2.4.1.3.1.	Mezcla asfáltica tradicional	155
4.2.4.1.3.2.	Mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho.....	156
4.2.4.2.	Controles al pavimento terminado.....	156
4.2.4.2.1.	Controles a Testigos	156
4.2.4.2.1.1.	Control de la Compactación	157
4.2.4.2.1.2.	Control del Espesor.....	159
4.2.4.2.1.3.	Control del Módulo Resiliente	160
4.2.4.2.2.	Control de la Deflexión	162
4.2.4.2.3.	Control de la Rugosidad (IRI).....	167
4.2.4.2.4.	Control del Coeficiente de fricción transversal (SCRIM)	170
4.2.4.2.5.	Control del Coeficiente de fricción (péndulo TRRL)	173
4.2.4.2.6.	Control de la Macrotextura por ensaye del círculo de arena	175
4.2.5.	Resumen.....	176

CAPÍTULO 5

ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO	178	
5.1.	Efecto de la disminución del tiempo de digestión.....	179
5.1.1.	Información de diseño de mezclas asfálticas en estudio.....	179
5.1.2.	Propiedades mecánicas	181
5.1.2.1.	Estabilidad Marshall	181
5.1.2.2.	Módulo Resiliente a 15°C y 25°C	182
5.1.2.3.	Sensibilidad al agua y Resistencia a Tracción indirecta a 15°C.....	184
5.1.2.4.	Ahuellamiento bajo agua a 50°C.....	186
5.2.	Análisis comparativo con estudios anteriores	189
5.2.1.	Información de diseño de mezclas asfálticas en estudio.....	189
5.2.1.1.	Dosificación.....	189
5.2.1.2.	Resistencia Conservada tras inmersión	192
5.2.1.3.	Análisis Marshall	192
5.2.2.	Módulo Resiliente a 25°C.....	193
5.2.3.	Compresión diametral	194

CAPÍTULO 6	
ESTUDIO COMPARATIVO DE COSTOS	195
6.1. Estudio de costos	196
CAPÍTULO 7	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	203
7.1. Conclusiones generales	203
7.2. Conclusiones específicas	205
7.3. Recomendaciones	207
BIBLIOGRAFÍA	209
ANEXO A	
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA	211
ANEXO B	
DISEÑO MARSHALL EMPRESA	222
ANEXO C	
PARÁMETROS MARSHALL	224
ANEXO D	
INMERSIÓN-COMPRESIÓN	230
ANEXO E	
SENSIBILIDAD AL AGUA Y TRACCIÓN INDIRECTA	232
ANEXO F	
COMPRESIÓN DIAMETRAL	237
ANEXO G	
MÓDULO RESILIENTE	239
ANEXO H	
CONTENIDO DE ASFALTO DE MUESTRAS ASFÁLTICAS	242
ANEXO I	
DMM DE MUESTRAS ASFÁLTICAS	244
ANEXO J	
TESTIGOS	246
ANEXO J.1	
CONTRATO REPOSICIÓN RUTA G-184	247
ANEXO J.2	
CONTRATO MEJORAMIENTO RUTA F-50	250
ANEXO K	
CÍRCULO DE ARENA	253
ANEXO L	
COEFICIENTE DE FRICCIÓN CON PÉNDULO TRRL	256
ANEXO M	
DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO	258

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.	Investigaciones nacionales sobre la incorporación de polvo de caucho en mezclas asfálticas por vía húmeda.....	3
Tabla 1-2.	Investigaciones nacionales sobre la incorporación de polvo de caucho en mezclas asfálticas por vía seca (realizadas en el LNV).....	3
Tabla 2-1.	Composición ponderal de los neumáticos en la Unión Europea	19
Tabla 2-2.	Terminología asociada al uso de polvo de caucho en mezclas asfálticas.	23
Tabla 2-3.	Bandas granulométricas especificadas para el polvo de caucho.	30
Tabla 3-1.	Ensayes de caracterización y requisitos para áridos en carpeta.....	34
Tabla 3-2.	Banda granulométrica semidensa IV-A-12.....	34
Tabla 3-3.	Ensayes de caracterización y requisitos para el CA 24.....	35
Tabla 3-4.	Bandas granulométricas especificadas para el polvo de caucho.	36
Tabla 3-5.	Requisitos para mezclas asfálticas tradicionales en capa de rodadura (ensayo Marshall).....	39
Tabla 3-6.	Requisito de resistencia conservada por ensayo de inmersión-compresión para mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho.....	42
Tabla 3-7.	Requisito de resistencia conservada por ensayo de tracción indirecta para mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho.	46
Tabla 3-8.	Clasificación internacional de la macrotextura.	59
Tabla 3-9.	Exigencias para las medidas del coeficiente de fricción con SCRIM.	61
Tabla 3-10.	Exigencias para las medidas del coeficiente de fricción con el péndulo TRRL.	62
Tabla 4-1.	Tipos de pavimento en el Proyecto y estructuración.	64
Tabla 4-2.	Ancho de pistas y bermas.	64
Tabla 4-3.	Estructura del pavimento asfáltico colocado.	65
Tabla 4-4.	Dosificación de áridos.	66
Tabla 4-5.	Granulometría de diseño y banda de trabajo del Contratista.	66
Tabla 4-6.	Fórmula de trabajo del Contratista.	67
Tabla 4-7.	Granulometría de áridos y banda especificada en el Proyecto.	68
Tabla 4-8.	Densidad y absorción de áridos.	68
Tabla 4-9.	Forma y desgaste de la mezcla de áridos.....	69
Tabla 4-10.	Cemento asfáltico original (CA-24).....	69
Tabla 4-11.	Cemento asfáltico después del Horno PDR.	70
Tabla 4-12.	Cemento asfáltico después del PAV.	70
Tabla 4-13.	Análisis Marshall y control de calidad, mezcla asfáltica tradicional.	71
Tabla 4-14.	Granulometría del polvo de caucho y banda especificada P-2.	72
Tabla 4-15.	Resistencia Conservada por ensayo de inmersión-compresión.....	75
Tabla 4-16.	Variación de la Resistencia Conservada por tracción indirecta con el tiempo y la temperatura de digestión.	76
Tabla 4-17.	Resistencia Conservada por tracción indirecta.	77

Tabla 4-18.	Análisis Marshall y control de calidad, mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho.	79
Tabla 4-19.	Fórmula de trabajo para la fabricación de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho.	80
Tabla 4-20.	Condiciones de mezclado/digestión y compactación de mezclas con y sin polvo de caucho.	81
Tabla 4-21.	Módulo resiliente y sensibilidad a la temperatura.	81
Tabla 4-22.	Resistencia a compresión diametral.	83
Tabla 4-23.	Condición de término en ensayo de Hamburgo.	85
Tabla 4-24.	Ahuellamiento en la falla de la mezcla asfáltica convencional.	85
Tabla 4-25.	Parámetros de ahuellamiento por ensayo de Hamburgo.	86
Tabla 4-26.	Fechas de la pavimentación del Tramo de Prueba.	86
Tabla 4-27.	Control de temperaturas en el Tramo de Prueba.	90
Tabla 4-28.	Singularidades (Km 0.077 al Km 1.000).	91
Tabla 4-29.	Controles receptivos en el Contrato Reposición Ruta G-184.	92
Tabla 4-30.	Ignición de muestras confeccionadas en Laboratorio, mezcla asfáltica modificada por vía seca.	94
Tabla 4-31.	Factor de corrección por agregado y polvo de caucho, mezcla asfáltica modificada por vía seca.	94
Tabla 4-32.	Control del contenido de asfalto en el Tramo de Prueba, faja derecha.	95
Tabla 4-33.	Control del contenido de asfalto en el Tramo de Prueba, faja izquierda.	95
Tabla 4-35.	Factor de corrección por agregado.	96
Tabla 4-36.	Control del contenido de asfalto en el Tramo de Prueba (factor de corrección por agregado).	96
Tabla 4-37.	Control de la densidad máxima de la mezcla, Tramo de Prueba.	97
Tabla 4-38.	Control de la compactación, pista N° 1.	99
Tabla 4-39.	Control de la compactación, pista N° 2.	100
Tabla 4-40.	Contenido de huecos, Tramo de Prueba.	101
Tabla 4-41.	Contenido de huecos, tramo con mezcla asfáltica tradicional.	101
Tabla 4-42.	Control del espesor, pista N° 1.	103
Tabla 4-43.	Control del espesor, pista N° 2.	103
Tabla 4-44.	Control del módulo resiliente en el Tramo de Prueba, pista N° 1.	104
Tabla 4-45.	Control del módulo resiliente en el Tramo de Prueba, pista N° 2.	104
Tabla 4-46.	Módulo resiliente de Terreno y Laboratorio, pista N° 1.	104
Tabla 4-47.	Módulo resiliente de Terreno y Laboratorio, pista N° 2.	105
Tabla 4-48.	Valores promedios de la deflectometría de impacto, pista N° 1.	109
Tabla 4-49.	Valores promedios de la deflectometría de impacto, pista N° 2.	109
Tabla 4-50.	Control del IRI, pista N° 1.	114
Tabla 4-51.	Control del IRI, pista N° 2.	115
Tabla 4-52.	Control del ahuellamiento, pista N° 1.	118
Tabla 4-53.	Control del ahuellamiento, pista N° 2.	118
Tabla 4-54.	Control del coeficiente de fricción transversal, pista N° 1.	124
Tabla 4-55.	Control del coeficiente de fricción transversal, pista N° 2 (sector sin polvo).	124
Tabla 4-56.	Control de la macrotextura (método del círculo de arena) en el Tramo de Prueba, pista N° 1.	125

Tabla 4-57.	Control de la macrotextura (método del círculo de arena) en el Tramo de Prueba, pista N° 2.	125
Tabla 4-58.	Control de la macrotextura con método perfilométrico, pista N° 1.	128
Tabla 4-59.	Control de la macrotextura con método perfilométrico, pista N° 2.	129
Tabla 4-60.	Resultados de los controles receptivos en el Tramo de Prueba, Contrato Mejoramiento Ruta G-184.	129
Tabla 4-61.	Ancho de pistas y bermas en sectores con pavimento asfáltico.	130
Tabla 4-62.	Estructura del pavimento asfáltico colocado.	131
Tabla 4-63.	Dosificación de áridos.	132
Tabla 4-64.	Granulometría de diseño y banda de trabajo del Contratista.	132
Tabla 4-65.	Fórmula de trabajo del Contratista.	132
Tabla 4-66.	Granulometría de áridos y banda especificada en el Proyecto.	133
Tabla 4-67.	Densidad y absorción de áridos.	134
Tabla 4-68.	Forma y desgaste de la mezcla de áridos.	134
Tabla 4-69.	Análisis Marshall y control de calidad, mezcla asfáltica tradicional.	135
Tabla 4-70.	Granulometría del polvo de caucho y banda especificada P-2.	135
Tabla 4-71.	Variación de la Resistencia Conservada por tracción indirecta con el contenido de asfalto.	136
Tabla 4-72.	Variación de la Resistencia Conservada por tracción indirecta con el tiempo de digestión.	138
Tabla 4-73.	Análisis Marshall y control de calidad, mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho.	140
Tabla 4-74.	Fórmula de trabajo para la fabricación de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho.	141
Tabla 4-75.	Condiciones de mezclado/digestión y compactación de mezclas con y sin polvo de caucho.	141
Tabla 4-76.	Módulo resiliente y sensibilidad a la temperatura.	142
Tabla 4-77.	Resistencia a tracción indirecta.	143
Tabla 4-78.	Condición de término en ensayo de Hamburgo.	145
Tabla 4-79.	Ahuellamiento en la falla de la mezcla asfáltica convencional.	145
Tabla 4-80.	Parámetros de ahuellamiento por ensayo de Hamburgo.	146
Tabla 4-81.	Fechas de la pavimentación del Tramo de Prueba y rendimiento.	146
Tabla 4-82.	Control de temperaturas en el Tramo de Prueba.	149
Tabla 4-83.	Controles receptivos en el Contrato Mejoramiento Ruta F-50.	150
Tabla 4-84.	Factor de corrección por agregado, mezcla asfáltica tradicional.	151
Tabla 4-85.	Control del contenido de asfalto, tramo con mezcla asfáltica tradicional.	152
Tabla 4-86.	Factor de corrección por agregado y polvo de caucho, mezcla asfáltica modificada por vía seca.	152
Tabla 4-87.	Control del contenido de asfalto en el Tramo de Prueba, pista N° 1.	153
Tabla 4-88.	Control del contenido de asfalto en el Tramo de Prueba, pista N° 2.	153
Tabla 4-89.	Control del contenido de asfalto en el Tramo de Prueba (factor de corrección por agregado).	154
Tabla 4-90.	Control de la granulometría (método de ignición), Tramo de Prueba.	155
Tabla 4-91.	Control de la densidad máxima de la mezcla, tramo con mezcla asfáltica tradicional.	156
Tabla 4-92.	Control de la densidad máxima de la mezcla, Tramo de Prueba.	156

Tabla 4-93.	Control de la compactación, pista N° 1.	157
Tabla 4-94.	Control de la compactación, pista N° 2.	158
Tabla 4-95.	Contenido de huecos, Tramo de Prueba.....	158
Tabla 4-96.	Contenido de huecos, tramo con mezcla asfáltica tradicional.....	159
Tabla 4-97.	Control del espesor, pista N° 1.....	159
Tabla 4-98.	Control del espesor, pista N° 2.....	160
Tabla 4-99.	Control del módulo resiliente, pista N° 1.	160
Tabla 4-100.	Control del módulo resiliente, pista N° 2.	161
Tabla 4-101.	Módulo resiliente de Terreno y Laboratorio, pista N° 1.	161
Tabla 4-102.	Módulo resiliente de Terreno y Laboratorio, pista N° 2.	161
Tabla 4-103.	Valores promedios de la deflectometría de impacto, pista N° 1.....	166
Tabla 4-104.	Valores promedios de la deflectometría de impacto, pista N° 2.....	166
Tabla 4-105.	Número Estructural de diseño requerido.....	167
Tabla 4-106.	Control del IRI, pista N° 1.....	169
Tabla 4-107.	Control del IRI, pista N° 2.....	170
Tabla 4-108.	Control del coeficiente de fricción transversal (SCRIM), pista N° 1.....	172
Tabla 4-109.	Control del coeficiente de fricción transversal (SCRIM), pista N° 2.....	172
Tabla 4-110.	Control del coeficiente de resistencia al deslizamiento (péndulo TRRL), pista N° 1.	174
Tabla 4-111.	Control del coeficiente de resistencia al deslizamiento (péndulo TRRL), pista N° 2.	174
Tabla 4-112.	Control de la macrotextura (método de círculo de arena), pista N° 1.....	175
Tabla 4-113.	Control de la macrotextura (método de círculo de arena), pista N° 2.....	176
Tabla 4-114.	Resultados de los controles receptivos en el Tramo de Prueba, Contrato Mejoramiento Ruta F-50.....	177
Tabla 5-1.	Condiciones de mezclado/digestión y compactación.	179
Tabla 5-2.	Resistencia Conservada por tracción indirecta a 15°C.	180
Tabla 5-3.	Parámetros Marshall y control de calidad.	181
Tabla 5-4.	Efecto del polvo de caucho y el tiempo de digestión en la estabilidad..	182
Tabla 5-5.	Efecto del polvo de caucho y el tiempo de digestión en la rigidez.	183
Tabla 5-6.	Efecto de la incorporación de polvo de caucho y el tiempo de digestión en la resistencia a la tracción (probetas secas).	185
Tabla 5-7.	Condición de término en ensayo de Hamburgo.	187
Tabla 5-8.	Ahuellamiento en la falla de la mezcla asfáltica sin polvo de caucho. ...	187
Tabla 5-9.	Parámetros de ahuellamiento por ensayo de Hamburgo.	188
Tabla 5-10.	Contenidos de asfalto de mezclas asfálticas originales y modificadas...	191
Tabla 5-11.	Características de diseño de mezclas asfálticas modificadas.....	191
Tabla 5-12.	Resistencia Conservada de mezclas asfálticas modificadas.	192
Tabla 5-13.	Parámetros Marshall de mezclas asfálticas modificadas.	193
Tabla 5-14.	Módulo resiliente a 25°C de mezclas asfálticas modificadas.	193
Tabla 5-15.	Resistencia a compresión diametral de mezclas asfálticas modificadas.	194
Tabla 6-1.	Precios de las mezclas asfálticas con colocación incluida.....	196
Tabla 6-2.	Precios de los cementos asfálticos.	197
Tabla 6-3.	Precios del polvo de caucho nacional.	197
Tabla 6-4.	Precios de las mezclas asfálticas y sus componentes.....	197
Tabla 6-5.	Dosificación referida al peso de la mezcla.	198

Tabla 6-6.	Peso de los componentes por metro cúbico de mezcla asfáltica (1700kg).....	199
Tabla 6-7.	Costos por metro cúbico de mezcla asfáltica.	199

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1.	Distribución de esfuerzos en pavimentos flexibles.	11
Figura 2-2.	Sección típica de un pavimento flexible.	12
Figura 2-3.	Principales componentes de un neumático.	20
Figura 2-4.	Etapas para la obtención del polvo de caucho.	20
Figura 2-5.	Trituración mecánica por acción de cuchillas.	21
Figura 2-6.	Polvo de caucho de tamaño menor a 2mm (izq.) y 1mm (der.).....	22
Figura 2-7.	Proceso por vía húmeda.	24
Figura 2-8.	Proceso por vía seca.....	26
Figura 2-9.	Micro y Macrotextura de la superficie de un pavimento.	32
Figura 3-1.	Martillo de compactación Marshall.	37
Figura 3-2.	Prensa Marshall y mordazas de carga.	38
Figura 3-3.	Resultados del análisis Marshall: Estabilidad, Densidad y Huecos.....	39
Figura 3-4.	Conjunto de compactación.....	41
Figura 3-5.	Probetas en saturación al vacío y probetas en baño de agua.....	44
Figura 3-6.	Prensa Marshall equipada con bastidor de ensayo (prensa Lottman).	44
Figura 3-7.	Equipo de ensayo para determinación de módulo resiliente.	46
Figura 3-8.	Amplitud de la deformación.....	47
Figura 3-9.	Bastidor para ensayo de tracción indirecta (prensa Lottman).	49
Figura 3-10.	Disposición en forma de “ocho” con probetas cilíndricas.	50
Figura 3-11.	Profundidad de ahuellamiento versus número de pasadas de la rueda.....	51
Figura 3-12.	Muestras de mezcla asfáltica inicial y masa residual de agregado (método de ignición).....	53
Figura 3-13.	Deflectómetro de Impacto.	56
Figura 3-14.	Equipo para la determinación de fuerzas transversales en SCRIM.	61
Figura 3-15.	Péndulo TRRL.....	62
Figura 4-1.	Identificación y numeración de pistas.....	63
Figura 4-2.	Planta general del Proyecto.	64
Figura 4-3.	Concreto asfáltico para capa de rodadura (Km 0.077 al Km 2.600).....	65
Figura 4-4.	Granulometría de la mezcla de áridos y banda especificada en el Proyecto.....	68
Figura 4-5.	Granulometría del polvo de caucho y banda especificada P-2.	72
Figura 4-6.	Variación de la Resistencia Conservada por tracción indirecta con el contenido de asfalto.	77
Figura 4-7.	Variación de la resistencia a tracción indirecta con el contenido de asfalto.....	78
Figura 4-8.	Módulo resiliente y sensibilidad a la temperatura.....	82
Figura 4-9.	Resistencia a compresión diametral.....	83
Figura 4-10.	Ahuellamiento bajo agua a 50°C por ensayo de Hamburgo.....	84
Figura 4-11.	Confección de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho en la Planta Asfáltica.....	87

Figura 4-12. Preparación de la superficie (riego de liga) para colocación de la mezcla asfáltica modificada.	87
Figura 4-13. Transporte de la mezcla en camiones cubiertos y carga de la finisher. ...	88
Figura 4-14. Colocación de la mezcla en el espesor proyectado.	88
Figura 4-15. Compactación de la mezcla (rodillo liso y rodillo neumático).	88
Figura 4-16. Chequeo de la densidad (densímetro nuclear) y la temperatura durante la compactación.	89
Figura 4-17. Apertura al tránsito y demarcación del pavimento.	89
Figura 4-18. Testigos extraídos del pavimento (carpeta + binder).	98
Figura 4-19. Deflexión máxima, pista N° 1 (10.10.2012).	106
Figura 4-20. Deflexión máxima, pista N° 2 (10.10.2012).	106
Figura 4-21. Módulo resiliente de la subrasante, pista N° 1 (10.10.2012).	107
Figura 4-22. Módulo resiliente de la subrasante, pista N° 2 (10.10.2012).	107
Figura 4-23. Número Estructural efectivo del pavimento, pista N° 1 (10.10.2012).	108
Figura 4-24. Número Estructural efectivo del pavimento, pista N° 2 (10.10.2012).	108
Figura 4-25. IRI, pista N° 1.	111
Figura 4-26. IRI, pista N°2.	112
Figura 4-27. Agrietamiento transversal en la junta (Km 0.500, faja izquierda). Inspección superficial concreto asfáltico en capa de rodadura (29.07.2013).	113
Figura 4-28. Ahuellamiento, pista N° 1 (14.11.2012).	117
Figura 4-29. Ahuellamiento, pista N° 2 (14.11.2012).	117
Figura 4-30. Coeficiente de fricción transversal, pista N° 1.	120
Figura 4-31. Coeficiente de fricción transversal, pista N° 2.	121
Figura 4-32. Presencia de polvo en la pista N° 2.	122
Figura 4-33. Macrotextura con método perfilométrico, pista N° 1 (14.11.2012).	127
Figura 4-34. Macrotextura con método perfilométrico, pista N° 2 (14.11.2012).	127
Figura 4-35. Disposición de los Tramos de Prueba en el Contrato.	131
Figura 4-36. Granulometría de áridos y banda especificada en el Proyecto.	134
Figura 4-37. Granulometría del polvo de caucho y banda especificada P-2.	136
Figura 4-38. Variación de la resistencia a tracción indirecta con el contenido de asfalto.	137
Figura 4-39. Variación de la Resistencia Conservada por tracción indirecta con el contenido de asfalto.	137
Figura 4-40. Variación de la resistencia a tracción indirecta con el tiempo de digestión.	138
Figura 4-41. Variación de la Resistencia Conservada por tracción indirecta con el tiempo de digestión.	139
Figura 4-42. Módulo resiliente y sensibilidad a la temperatura.	142
Figura 4-43. Resistencia a tracción indirecta.	143
Figura 4-44. Ahuellamiento bajo agua a 50°C por ensayo de Hamburgo.	144
Figura 4-45. Probetas ensayadas en la Rueda de Hamburgo.	145
Figura 4-46. Confección de la mezcla asfáltica con polvo de caucho en Planta.	147
Figura 4-47. Preparación de la superficie (riego de liga) y carga de la finisher.	147
Figura 4-48. Control de la temperatura durante la extensión de la mezcla asfáltica modificada y muestreo (en finisher).	148
Figura 4-49. Colocación de la mezcla asfáltica modificada al espesor proyectado. ...	148

Figura 4-50. Extensión y compactación en pista N° 2 (rodillo liso).....	148
Figura 4-51. Compactación en pista N° 2 (rodillo liso y rodillo neumático).....	148
Figura 4-52. Compactación de pista N° 2 finalizada.....	149
Figura 4-53. Deflexión máxima, pista N° 1 (7.05.2013).....	163
Figura 4-54. Deflexión máxima, pista N° 2 (7.05.2013).....	163
Figura 4-55. Módulo resiliente de la subrasante, pista N° 1 (7.05.2013).....	164
Figura 4-56. Módulo resiliente de la subrasante, pista N° 2 (7.05.2013).....	164
Figura 4-57. Número Estructural efectivo del pavimento, pista N° 1 (7.05.2013).....	165
Figura 4-58. Número Estructural efectivo del pavimento, pista N° 2 (7.05.2013).....	165
Figura 4-59. IRI, pista N° 1 (22.04.2013).....	168
Figura 4-60. IRI, pista N° 2 (22.04.2013).....	168
Figura 4-61. Coeficiente de fricción transversal, pista N° 1 (22.05.2013).....	171
Figura 4-62. Coeficiente de fricción transversal, pista N° 2 (22.05.2013).....	171
Figura 5-1. Resistencia Conservada por tracción indirecta a 15°C.	180
Figura 5-2. Efecto del polvo de caucho y el tiempo de digestión en la rigidez.	183
Figura 5-3. Efecto de la incorporación de polvo de caucho y el tiempo de digestión en la resistencia a la tracción.....	184
Figura 5-4. Efecto de la incorporación de polvo de caucho y el tiempo de digestión en el ahuellamiento por ensayo de Hamburgo.....	186
Figura 5-5. Granulometría del polvo de caucho nacional y banda especific. P-2.....	190
Figura 5-6. Granulometría del polvo de caucho importado y banda especific. P-3.	191
Figura 6-1. Precios de las mezclas asfálticas por metro cúbico.	198
Figura 6-2. Costos por metro cúbico de mezcla asfáltica.	200
Figura 6-3. Costos relativos en la mezcla asfáltica tradicional.	200
Figura 6-4. Costos adicionales por el uso de las mezclas asfálticas modificadas (vía seca vs. asfaltos elastoméricos).....	201

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Los neumáticos fuera de uso (NFU) constituyen un grave problema medioambiental en Chile y en el mundo, debido principalmente a las dificultades que conlleva su adecuada disposición final. Su lento proceso de descomposición, que requiere entre 500 y 3000 años, lo convierten prácticamente en un residuo no degradable. Sumado a esto, lo dificultoso que resulta su gestión, por su gran volumen y generación dispersa, y la falta de políticas y normas medioambientales que los regulen, hace que la mayoría de los neumáticos desechados se encuentren generando contaminación; acumulándose en sitios eriazos y vertederos clandestinos o siendo quemados a cielo abierto para disminuir el gran espacio que ocupan, sin los cuidados que esto requiere. Esto afecta el paisaje y degrada la imagen de las comunidades aledañas.

Los neumáticos en desuso, sin embargo, tienen una amplia gama de posibilidades de ser valorizados en aplicaciones de reutilización (recauchutado), recuperación energética (para la generación de energía) y reciclado. En particular su reciclaje, permite la recuperación y el aprovechamiento de sus componentes materiales, principalmente caucho vulcanizado, acero y fibras textiles, los cuales pueden ser integrados en sistemas productivos para disminuir el consumo de materias primas. Se debe tener presente que en un neumático, alrededor del 50% de su composición son cauchos naturales y sintéticos con variadas posibilidades de reutilización. Por otro lado, el material textil (0-5%) generalmente se ocupa como aislante térmico o como relleno, mientras que el acero (15-30%) se comercializa para distintos usos.

Las mezclas asfálticas en caliente utilizadas en pavimentos, pueden incorporar una parte importante del caucho contenido en estos y por consiguiente tiene un interesante potencial para consumir neumáticos en desuso. La adición de caucho a las mezclas asfálticas no tan solo contribuye a mitigar el problema ambiental asociado a estos, sino que también permite mejorar las propiedades del pavimento de una manera más económica que con otros modificadores alternativos. En efecto, las mezclas asfálticas con incorporación de caucho proporcionan un pavimento con mejores respuestas a los cambios térmicos, así como también mayor resistencia a la fisuración por fatiga, al ahuellamiento y al envejecimiento, de esta manera, se aumenta la vida útil de los caminos y disminuyen los costos de mantenimiento. Adicionalmente, reducen el nivel de ruido generado por los vehículos al contacto con el pavimento y aumentan el contraste con las marcas viales (superficies de un color más negro y durable).

El caucho reciclado de neumáticos se obtiene a través de la trituración de éstos en plantas de reciclaje y la separación de los otros componentes que los constituyen

(acero y textiles). La trituración de los neumáticos se realiza principalmente por dos métodos, uno mecánico a temperatura ambiente y otro criogénico a baja temperatura. A través de estos procesos, se obtiene partículas de caucho con determinadas granulometrías para distintas aplicaciones. La utilización para la confección de mezclas asfálticas precisa del material fino obtenido de la trituración, denominado polvo de caucho de NFU, que corresponde a partículas de tamaños inferiores a 2.3mm.

Las formas más comunes de incorporación del polvo de caucho reciclado dentro de las mezclas asfálticas son la vía húmeda y la vía seca. En la primera, el caucho es mezclado previamente con el cemento asfáltico a temperaturas elevadas para producir un ligante modificado denominado asfalto-caucho, que se añade posteriormente a los agregados pétreos. En la vía seca, el polvo de caucho se añade a la mezcla como un agregado más (fracción fina de áridos), antes de la incorporación del cemento asfáltico, siendo el producto usualmente denominado mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho. En ambos métodos, el caucho interactúa con el asfalto en un proceso denominado digestión, que tiene principalmente dos efectos en él; el primero es el aumento de su viscosidad y el segundo, es la modificación de su reología (su comportamiento en función de la temperatura y el tiempo de carga), que aumenta su resiliencia y elasticidad a altas temperaturas y disminuye su susceptibilidad térmica.

La intensidad de estas modificaciones depende de las condiciones en que la digestión sea realizada, lo que a su vez depende del tipo y naturaleza del asfalto, del sistema de incorporación (vía húmeda o seca), de la granulometría y el proceso de obtención del polvo de caucho de NFU, de las proporciones relativas de los componentes de la mezcla, y de las condiciones de ejecución de la mezcla asfáltica (temperatura de digestión, tiempo de digestión, etc.), entre otros.

La incorporación de polvo de caucho en mezclas asfálticas en caliente, tanto por vía húmeda como seca, no es reciente. Varios países, como USA, Canadá y España, han utilizado este tipo de mezclas en tareas de conservación y construcción de pavimentos. En Sudamérica, países como Brasil, México y Colombia han realizado tramos experimentales usando también ambos procesos. Básicamente la incorporación de polvo de caucho ha sido aplicada a capas asfálticas de rodadura y, en menor medida a capas intermedias (binder), con muy buenos resultados en la mayoría de los casos.

En Chile, estas nuevas tecnologías tienen muy poco uso, y se han tratado de integrar a través de investigaciones y estudios para, a través de ellos, dar a conocer y fomentar su utilización en proyectos viales (Tabla 1-1 y Tabla 1-2). En relación a la vía húmeda, la Dirección de Vialidad ha realizado dos tramos de prueba con estas mezclas asfálticas en capas de rodadura; el primero de ellos, se encuentra en la Ruta X-65 de la Undécima Región de Aysén y se construyó el año 2004, y el segundo tramo se ejecutó en la Rehabilitación de la Ruta 60-CH de la Provincia de Los Andes, V Región, el año 2005.

Con respecto al proceso por vía seca, se han realizado una serie de investigaciones para la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, llevadas a cabo desde el año 2006 por el Laboratorio Nacional de Vialidad (LNV) a través de alumnos que han desarrollado sus estudios de Tesis de pregrado guiados por profesionales del área. En estas, se ha estudiado progresivamente a nivel de Laboratorio el efecto de la incorporación de polvo de caucho de NFU en las mezclas asfálticas bajo los estándares españoles, ajustando tal proceso a la realidad nacional y con resultados acordes a los esperados según la experiencia internacional (Tabla 1-2).

Tabla 1-1. Investigaciones nacionales sobre la incorporación de polvo de caucho en mezclas asfálticas por vía húmeda.

Año	Nombre	Autor	Universidad
2000	Estudio del mejoramiento del asfalto en base a reciclados de neumáticos.	Empresa Probisa	-
2001	Incorporación de caucho de neumáticos desechables en asfalto.	Patricio Gutiérrez Ruiz	Universidad de Chile.
2002	Estudio de factibilidad técnica y estimación de la demanda de pavimentos de asfalto modificado con caucho de neumáticos desechados	Pablo Badilla Montes	Universidad de Chile.
2005	Aplicación de mezclas asfálticas modificadas con caucho, programa de seguimiento en ruta X-65 y 60-CH	Yasmila Herrera Toledo	Universidad de Chile.

Tabla 1-2. Investigaciones nacionales sobre la incorporación de polvo de caucho en mezclas asfálticas por vía seca (realizadas en el LNV).

Año	Nombre	Autor	Universidad
2006	Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco.	Náyade Ramírez Palma	Universidad de Chile.
2007	Estudio del efecto de la variación en la granulometría del caucho en mezclas asfálticas por vía seca.	Raúl Segovia Airaudo	Universidad de Chile.
2011	Evaluación cuantitativa del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas modificadas incorporando polvo de caucho de NFU nacional mediante vía seca.	Ricardo Urrutia Torres	Universidad Andrés Bello.

El presente trabajo se enmarca dentro de estas investigaciones y, al igual que ellas, tiene como uno de sus objetivos fundamentales aportar a la confección de una especificación técnica para la construcción de capas de rodadura constituidas con estas mezclas asfálticas especiales, de manera similar a la Sección 5.408 del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras, donde se encuentran normalizadas las mezclas asfálticas en caliente convencionales, sin adición de caucho.

Hasta el momento se han definido los criterios que rigen la selección y uso del polvo de caucho de NFU en la confección de mezclas asfálticas por vía seca (porcentaje de adición, granulometrías, etc.) y se han formulado especificaciones técnicas tentativas para la dosificación, fabricación y puesta en obra de estas mezclas asfálticas modificadas, siempre optimizando el empleo del polvo de caucho para conseguir los beneficios potenciales de la técnica por vía seca.

Con este escenario actual, la necesidad de verificar las especificaciones técnicas propuestas y de definir y validar las referidas a los controles de calidad y criterios de aprobación de las unidades de pavimento terminadas, confeccionados con estas mezclas en carpeta, es de primera importancia. El origen del presente trabajo proviene de tales inquietudes, y es que su uso en futuras obras viales nacionales se espera que prospere de manera favorable, dado que el incremento en el volumen del tránsito y de las cargas impuestas por éste, exige mezclas asfálticas cada vez más durables, con mejor desempeño y al menor precio posible. Además, la fabricación por esta vía (seca), a diferencia del proceso húmedo, no requiere de equipos especiales, de manera que es accesible a cualquier empresa fabricante.

Actualmente en Chile, el enorme volumen de neumáticos en desuso que se generan anualmente, que bordea las 40.000 toneladas y de las cuales solo se recicla el 23% (9.000 toneladas al año), ha generado reacciones como el Proyecto de Ley de Residuos del Ministerio del Medio Ambiente, en que se norma la responsabilidad extendida del productor (REP) en materia de reciclaje, fundamentado en el principio de quien contamina paga y que les asigna a estos la responsabilidad por todo el ciclo de vida del producto. Entre las posibles aplicaciones de reciclaje, el empleo prioritario del caucho de desecho en obras públicas, y en especial en pavimentos, despierta gran interés por el elevado potencial de consumo de NFU. Recientemente en el país, se publicó la Norma NCh 3258-2012 con los requisitos que el polvo de caucho de NFU debe cumplir para su utilización en mezclas asfálticas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

El objetivo principal de esta memoria es la confección y seguimiento de los dos primeros tramos de prueba con carpetas fabricadas con mezclas asfálticas en caliente con adición de polvo de caucho de neumáticos fuera de uso (NFU) por vía seca. El polvo de caucho ocupado, pertenece a una planta nacional de reciclaje de neumáticos desechados.

Estos tramos de prueba, permitirán verificar y mejorar el actual proyecto de Especificación Técnica para el Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, que pretende normar los trabajos de construcción de las

capas de rodadura constituidas con estas mezclas asfálticas, y además complementarlo, estableciendo los procedimientos y criterios para la evaluación de su calidad, una vez que sean puestas en servicio (controles receptivos y criterios de aceptación y rechazo).

1.2.2. Objetivos específicos

- Estudiar en Laboratorio, el efecto de la incorporación de polvo de caucho de NFU nacional por vía seca en mezclas asfálticas y el efecto de variar el tiempo de digestión en el comportamiento mecánico. Analizar estos resultados con los obtenidos en investigaciones anteriores.
- Caracterizar y evaluar la calidad de pavimentos fabricados con mezclas asfálticas en caliente modificadas con polvo de caucho por vía seca en la capa de rodadura. Comparar estos, según su condición funcional y estructural, con los pavimentos asfálticos convencionales.
- Verificar y mejorar las especificaciones técnicas tentativas actuales, para la dosificación, fabricación y puesta en obra de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho por vía seca en capas de rodadura, y proponer las referidas a los controles receptivos y criterios de aprobación de las unidades terminadas.
- Analizar la factibilidad técnica y económica de realizar pavimentos confeccionados con mezclas asfálticas en caliente con incorporación de polvo de caucho por vía seca en Chile.
- Establecer recomendaciones sobre el empleo de polvo de caucho en la construcción de capas de rodadura constituidas con estas mezclas asfálticas (vía seca).

1.3. Metodología

- a. Recopilación de información referente al tema.

Recoger conocimientos y experiencias nacionales y extranjeras para utilizar adecuadamente el polvo de caucho reciclado como un componente más de una mezcla asfáltica (vía seca).

Se hace notar que se tienen en consideración principalmente los resultados de las investigaciones anteriores realizadas por alumnos de pregrado en el Laboratorio Nacional de Vialidad (Tabla 1-2).

- b. Definición del Contrato donde incorporar el tramo experimental con una mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho por vía seca dispuesta en su capa de rodadura.

Los tramos experimentales se ejecutan en Contratos de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (MOP), correspondientes a Mejoramientos o Reposiciones de pavimentos de tipo concreto asfáltico, y son parte de las Metas anuales de la Subdirección y Dirección de Obras. Estos comprenden una longitud aproximada de 500m en los respectivos Proyectos de los cuales son parte, cuyas extensiones son variadas, de 5 y 12km aproximadamente. Para la selección de la obra, se procura escoger un Contrato que implique la construcción de un pavimento asfáltico nuevo. Los Proyectos escogidos son los siguientes:

- Tramo de Prueba I: Contrato **“Reposición Ruta G-184 Sector El Noviciado, Tramo Km. 0.077 – Km. 5.400, Comuna de Pudahuel, Provincia de Santiago, Región Metropolitana”**.
- Tramo de Prueba II: Contrato **“Mejoramiento Ruta F-50, Lo Orozco- Quilpué, Km. 17.578 al Km. 29.498, Región de Valparaíso”**.

Las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho a utilizar en los Tramos de Prueba, se fabrican a partir de la dosificación de la mezcla con asfalto tradicional utilizada en la capa de rodadura del Contrato al cual pertenecen. La dosificación de las mezclas asfálticas con cemento asfáltico tradicional, también denominadas convencionales o tradicionales, está a cargo de la Empresa Contratista (o Subcontratista) que lleva a cabo la construcción de los Proyectos.

- c. Confección y Seguimiento de Tramos de Prueba

En ambos Tramos de Prueba, el trabajo comprende una primera etapa a nivel de Laboratorio y una segunda etapa en Terreno. Estas se resumen a continuación:

c.1. A nivel de Laboratorio:

- Caracterización y control de calidad (cumplimiento de especificaciones) de los materiales componentes de las mezclas asfálticas.

- Áridos: Se evalúan propiedades como granulometría, dureza, rozamiento interno, entre otras, según acápite 5.408.201 del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras.
 - Cemento asfáltico tradicional: Se evalúan propiedades como viscosidad, ductilidad, dureza, entre otras, según acápite 5.408.202 del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras.
 - Polvo de caucho: Se determina su granulometría según la Norma NCh 3258: 2012.
- Visación de la dosificación de diseño de la mezcla asfáltica convencional que se utiliza en el resto del Contrato (mezcla base): Se verifica el cumplimiento de las especificaciones establecidas en el acápite 5.408.203 del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras, relativas al Método Marshall (propiedades de estabilidad, fluencia, densidad, huecos de aire, entre otras).
- Diseño de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho para capa de rodadura que se utiliza en el Tramo de Prueba:
 - Determinación de los contenidos de cemento asfáltico y polvo de caucho (granulometría conocida) a incorporar en la mezcla asfáltica modificada, y la temperatura y tiempo mínimos para un proceso de digestión efectivo, que asegure que esta mezcla tenga mejores propiedades mecánicas que una mezcla asfáltica convencional, sin la incorporación de caucho.
 - Verificación del diseño de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho:
 - Cumplimiento de controles de calidad especiales basados en la normativa española.
 - Caracterización de la mezcla asfáltica modificada según el Método Marshall y verificación del cumplimiento de especificaciones nacionales para mezclas asfálticas convencionales (5.408.203 del M.C.V-5).
 - Caracterización de su comportamiento mecánico y comparación con el comportamiento de una mezcla asfáltica sin incorporación de polvo de caucho. Las propiedades mecánicas de las mezclas se determinan a través de los siguientes ensayos:
 - Ensayo de Tracción indirecta (resistencia a la tracción).
 - Módulo Resiliente (caracterización del comportamiento esfuerzo-deformación bajo carga repetida).
 - Ahuellamiento bajo agua (caracterización de la resistencia a la deformación plástica y susceptibilidad a la humedad (stripping)).

El procedimiento de diseño difiere del de una mezcla asfáltica convencional (Método Marshall), ya que se requiere la realización de ensayos adicionales para determinar las condiciones de digestión óptimas (ensayo de Sensibilidad al agua o ensayo de Inmersión-Compresión). El parámetro medido (Resistencia Conservada tras inmersión) se evalúa bajo los estándares españoles. Adicionalmente, se requiere validar el diseño, para esto se realizan ensayos que permitan caracterizar las mezclas asfálticas según su comportamiento mecánico y, en consecuencia, comparar los distintos tipos mezclas (con y sin incorporación de polvo de caucho).

Los diversos ensayos se realizan en las dependencias del Laboratorio Nacional de Vialidad (Área de Asfalto), el Laboratorio Metropolitano de Vialidad, el Laboratorio de la Empresa Ferrovial Chile S.A. y en el Centro de Desarrollo e Investigación (CDI) de Bitumix.

c.2. A nivel de Terreno:

Realización de controles receptivos según la normativa nacional vigente para mezclas asfálticas en caliente convencionales (5.408.3 del M.C.V-5):

- Realización de controles de calidad a las mezclas asfálticas fabricadas en Planta, tanto a la representativa del Tramo de prueba como a la convencional representativa del resto del Contrato. Durante su colocación en terreno, se miden temperaturas y se toman muestras de mezcla asfáltica para evaluar el contenido de asfalto, la granulometría, la densidad, etc.
- Realización de Controles a los pavimentos terminados, tanto en el Tramo de Prueba como en el tramo confeccionado con la mezcla asfáltica convencional (en la capa de rodadura). En cada caso, se caracterizan y evalúan los pavimentos según su condición estructural y funcional, para asegurar una superficie con estándares mínimos de durabilidad, comodidad y seguridad. Las propiedades a medir son:
 - Compactación y espesor a partir de testigos.
 - Deflexiones.
 - Control de Rugosidad (IRI).
 - Ahuellamiento.
 - Medición del Coeficiente de Fricción.
 - Medición de Macrotextura.

Las mediciones se realizan con los equipos del Subdepartamento de Auscultaciones del Laboratorio Nacional de Vialidad.

- d. Confección de mezclas asfálticas en caliente con adición de polvo de caucho por vía seca a distintos tiempos de digestión y análisis de su efecto en las propiedades mecánicas medidas en Laboratorio (Estabilidad, Tracción indirecta, Módulo Resiliente y Ahuellamiento en agua).
- e. Estudiar los costos de confeccionar pavimentos fabricados con las mezclas asfálticas en estudio (tradicional y modificada por vía seca con polvo de caucho), según datos provistos por las Empresas fabricantes y constructoras.

1.4. Antecedentes generales: Situación nacional

En Chile, según un estudio del año 2008 realizado por el Consejo de Producción Limpia (CPL) y la Cámara de la Industria de Neumático de Chile (CINC), de los cerca de 3 millones de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) de autos y camiones que se generan cada año, equivalente a 40.300 toneladas anuales de este desecho (este valor no incluye a la industria minera que genera 12 mil toneladas anuales), se determinó que en esa fecha, casi el 95% de los NFU generados tuvo un vertido desconocido en basurales y en lugares desconocidos o no autorizados (solo el 5% se destinaron a combustible alternativo, estabilización de laderas de rellenos sanitarios y uso agrícola).

Para mejorar el escaso reciclaje, la CINC y el CPL firman el Acuerdo de Producción Limpia (APL) en el año 2009, un convenio voluntario para la recuperación de este producto al que están suscrito las principales empresas del rubro; Goodyear, Michelin, Bridgestone - Firestone y Pirelli, importadores, distribuidores, puntos de venta, plantas recauchadoras y grandes usuarios. La firma del compromiso del APL, surgió como una iniciativa del Ministerio del Medio Ambiente para introducir el concepto de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) en las empresas chilenas.

Fruto de esta alianza, se ha logrado la creación de un sistema de gestión de flota que permite formalizar la recolección, los centros de acopio y el destino final de los neumáticos usados. El año 2010 se creó la primera planta de trituración mecánica de Neumáticos Fuera de Uso en el país (Polambiente), que le ha dado el tratamiento adecuado y responsable a los neumáticos que ya no se utilizan, y valor agregado al caucho vulcanizado, a través de su reciclaje en forma de gránulos y polvo, usado mayormente en productos moldeados y carpetas (canchas de pasto sintético, superficies deportivas y en la producción de palmetas de seguridad para juegos infantiles).

A cinco años de la firma del convenio, las cifras mejoraron sustancialmente: hoy el reciclaje de los neumáticos fuera de uso alcanza el 23%, lo que se traduce en un millón y medio de neumáticos al año (9000 toneladas al año). La gestión por el momento solo se concentra en la Región Metropolitana, Valparaíso y O'Higgins, que representan el 50% del parque generador de NFU del país. A partir de esta primera

etapa, el sistema se extenderá a otras regiones y en el futuro se espera gestionar NFU de mayores tamaños. Así, se estima eliminar entre un 30 y 40% del total de NFU generado (10 mil a 14 mil toneladas).

En Chile no existe legislación específica para la gestión de los NFU, algo habitual en países más desarrollados, sin embargo, se espera la futura entrada en vigencia de la Ley de Residuos, promovida por el Ministerio del Medio Ambiente, que marcará la pauta para los residuos masivos (no tan solo neumáticos). La normativa legal tiene como objetivo normar la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) en materia de reciclaje (cuyas bases fueron elaboradas a partir del APL) y además, generar un procedimiento que establezca metas de revalorización, reutilización y elaboración de normas técnicas, a través de las cuales se establezcan los requerimientos mínimos para el uso de material reciclado. Con esto, las Empresas tendrían que incorporar conceptos de sustentabilidad en sus procesos productivos. La iniciativa ambiental, será presentada este año al Congreso.

El propósito, entonces hoy, es potenciar la investigación y desarrollo en Chile, que aporte al éxito del proyecto de neumáticos en desuso en las áreas de mezclas asfálticas, aplicación en obras civiles (drenes, terraplenes, vertederos y rellenos) y edificación (aislantes térmicos y acústicos, impermeabilizaciones), con gran potencial de consumo de caucho de neumáticos.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

Un pavimento flexible convencional se define tradicionalmente como un sistema de capas asfálticas y granulares superpuestas (sistema multicapa), que se disponen de manera que aquellas de mejor calidad estructural se ubican más cerca de la superficie, donde los esfuerzos desarrollados por las cargas de tránsito son mayores. Las capas asfálticas constituyen la estructura superior del pavimento, mientras que las granulares, la inferior.

Al no ser de naturaleza rígida, las deformaciones sufridas se transmiten a todas las capas, produciendo una distribución de esfuerzos importantes sobre la subrasante, que marca la cota del movimiento de tierra terminado. Además, los esfuerzos alcanzados para cualquier punto de la estructura son máximos cuando la carga se encuentra justo sobre él, y disminuyen paulatinamente a medida que aumenta la profundidad.

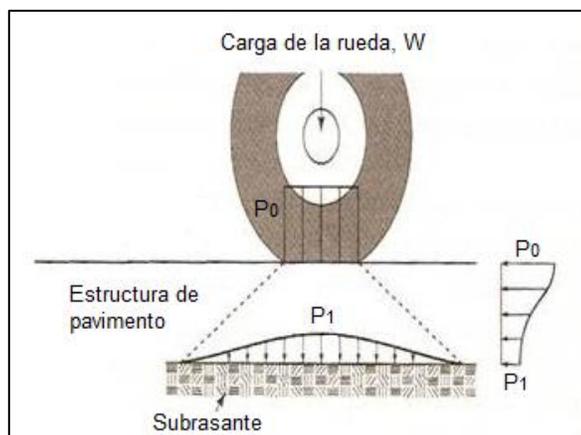


Figura 2-1. Distribución de esfuerzos en pavimentos flexibles.

El diseño de pavimentos consiste en determinar los espesores y características de las capas necesarios para dotarlos, durante un periodo de tiempo determinado, de un sistema estructuralmente resistente a las sollicitaciones que impone el tránsito, proporcionando una superficie de circulación cómoda y segura, considerando el efecto de diversas condiciones climáticas y procurando ser lo más económico en el logro de tales objetivos. Se debe tener presente que la cantidad de capas granulares y asfálticas que se requieran depende del tránsito, tipo de suelo natural, entre otros factores.

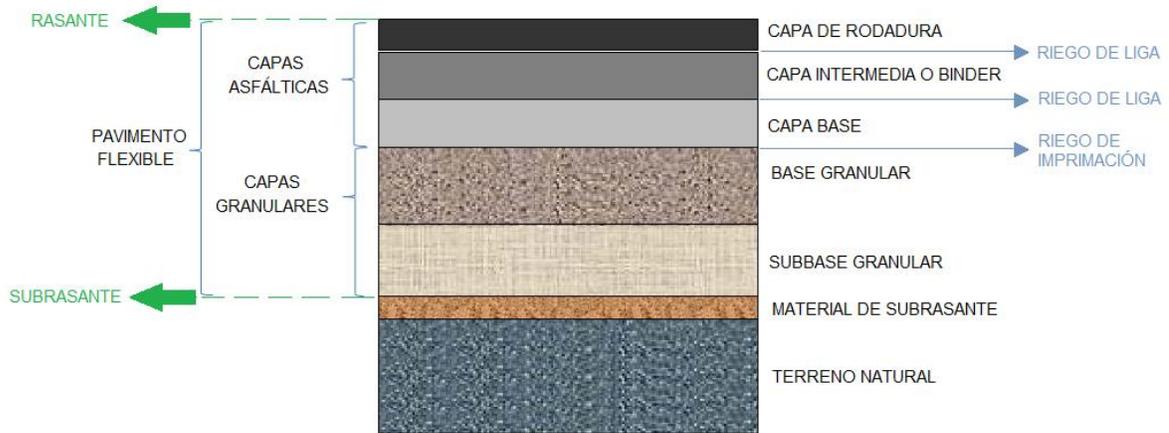


Figura 2-2. Sección típica de un pavimento flexible.

La base de los pavimentos flexibles la conforman una o más capas granulares constituidas con diversos tipos de áridos, los cuales son adecuadamente seleccionados, graduados y eventualmente tratados con diversos agentes estabilizantes. En general, la estructura granular se clasifica en:

- a. **Capa de Base Granular** (CBR entre 80% a 120%): Desarrolla un papel estructural, ya que debe absorber parte de la carga vehicular. Distribuye los esfuerzos, para que resulten aceptables por las capas inferiores y el suelo, y no se provoquen deformaciones.
- b. **Capa de sub-base Granular** (CBR entre 30% a 60%): Sus funciones son similares a las de la base, aunque adicionalmente actúa como un regulador del soporte. En algunos casos se encarga de filtrar, esto es, de impedir la migración de finos arcillosos de la subrasante hacia la base (capa anticontaminante). Asimismo, evita la ascensión capilar del agua procedente del apojo.

Por su parte, las capas asfálticas aparte de cumplir un importante rol resistente, donde la resistencia de cada capa depende de la composición de la mezcla asfáltica y el espesor en que es colocada, deben proveer a las capas de apoyo de una adecuada protección contra los efectos ambientales. Adicionalmente, tienen que asegurar la circulación permanente con estándares mínimos de seguridad y confort para el usuario. Según su posición relativa dentro del pavimento, las capas asfálticas se clasifican en:

- a. **Capa de Base Asfáltica:** Se ubica inmediatamente sobre la base granular imprimada, pudiendo ir sobre ella la capa intermedia o la capa de rodado. Debe absorber gran parte de las tensiones, y resistir la repetición de flexiones o esfuerzos sin agrietarse por fatiga.

b. Capa Asfáltica Intermedia o Binder: Se ubica sobre la base asfáltica o directamente sobre la base granular. Se utilizan como capa complementaria estructural para mejorar la resistencia de un pavimento.

Capa de Rodadura o Carpeta: Capa visible de la estructura, que debe proporcionar una superficie cómoda y segura para la conducción de vehículos, y que resista la abrasión y desintegración por acción directa de las cargas de tránsito y el ambiente. Tiene que cumplir también una función impermeabilizante, para impedir el ingreso de agua a las capas inferiores.

2.1. Mezclas asfálticas

Una mezcla asfáltica la constituye básicamente una combinación, en proporciones prestablecidas, de agregados pétreos de diferentes granulometrías, un material asfáltico y, eventualmente, aditivos, donde todas las partículas de agregado están recubiertas con una película continua y homogénea de cemento asfáltico.

La mezcla asfáltica para pavimentación es sometida a un proceso de compactación, que le permite a los materiales constituyentes trabajar como un conjunto, en el cual el material asfáltico actúa como un agente ligante que aglutina las partículas de agregado en una masa cohesiva y poco permeable, y el agregado mineral ligado, actúa como un esqueleto pétreo, que aporta resistencia y rigidez al sistema.

Existen diversos tipos de mezclas asfálticas que, según su temperatura de fabricación, pueden clasificarse principalmente en mezclas en caliente (confeccionadas a temperaturas sobre los 100°C) o en frío (confeccionadas a temperatura ambiente o ligeramente superior), siendo más usadas y con mayor resistencia las primeras. A este tipo de mezclas se enfoca el presente estudio.

2.1.1. Mezclas asfálticas en caliente

Para confeccionar mezclas asfálticas en caliente, el cemento asfáltico y los agregados pétreos se deben llevar a temperaturas elevadas, generalmente en el rango de los 150°C, con el objetivo de obtener una adecuada viscosidad en el ligante (estado de fluidez) que asegure la trabajabilidad necesaria para mezclar y compactar la mezcla. La viscosidad de una mezcla asfáltica a una temperatura específica depende exclusivamente del tipo de asfalto a emplear. Existen cementos asfálticos tradicionales, modificados con polímeros y de tipo multigrado.

El proceso de fabricación de una mezcla asfáltica en caliente se realiza en una Planta Asfáltica, que es una instalación compuesta por un conjunto de equipos, en los

cuales los agregados se dosifican, combinan, calientan, secan y mezclan con el asfalto, para producir la mezcla con las proporciones deseadas y que cumpla con todas las especificaciones Técnicas de Proyecto, de acuerdo a su uso en el pavimento, como capa base, intermedia o de rodadura. Las mezclas asfálticas se transportan al lugar de pavimentación en camiones tolva, los cuales deben disponer de cubiertas de protección para minimizar las pérdidas de temperatura durante el transporte.

Antes de iniciar las faenas de colocación en terreno, se debe preparar la superficie a pavimentar con el objetivo principal de producir una membrana ligante que adhiera fuertemente la superficie con la capa asfáltica que la cubrirá. Si se coloca la capa asfáltica sobre un pavimento asfáltico antiguo debe colocarse un riego de liga, y si se coloca sobre una base granular, debe colocarse un riego de imprimación.

La pavimentación consiste en distribuir y compactar la mezcla asfáltica en caliente que ha sido producida en Planta (en el espesor proyectado). La compactación debe comenzar tan pronto como sea posible después que el material ha sido distribuido por la pavimentadora o finisher. Con este proceso se logra aumentar la resistencia y estabilidad de la mezcla asfáltica, disminuyendo el volumen de huecos y aumentando la densidad, y se obtiene una superficie suave y bien consolidada, resistente al desgaste producto del paso de los vehículos.

Los compactadores típicos utilizados son: rodillo liso (dos rodillos de acero montados sobre ejes tándem), rodillo vibratorio (dos rodillos de acero en tándem) y rodillo neumático (dos ejes tándem con 3 a 4 ruedas de caucho en el eje delantero y 4 a 5 en el eje trasero). La cantidad, peso y tipo de rodillos que se empleen deberá ser el adecuado para alcanzar la compactación requerida dentro del lapso de tiempo durante el cual la mezcla asfáltica es trabajable. La compactación debe continuar hasta eliminar toda marca de rodillo y alcanzar la densidad especificada, control que se realiza en obra con un equipo denominado densímetro nuclear. Con la mezcla ya fría, se puede dar la apertura al tránsito.

2.1.1.1. Áridos

Los áridos que componen una mezcla asfáltica (alrededor del 95% de su peso), también denominados agregados pétreos, se clasifica en árido grueso, fino y polvo mineral o filler.

Según el Manual de Carreteras, se denomina agregado grueso a la porción del árido retenida en el tamiz ASTM N° 8 (abertura de 2.5mm) y agregado fino, a la porción que pasa dicho tamiz. Por su parte, el filler está constituido por polvo mineral fino, tal como cemento hidráulico, cal u otro material inerte, libre de materia orgánica y partículas de arcilla, cuyo tamaño máximo absoluto es 0.63mm, y que pasa por el tamiz ASTM N° 200 (0.08mm) en más del 70% en peso.

Para la confección de una mezcla asfáltica, los agregados deben ser limpios, tenaces y durables y, lo más importante, deben tener una granulometría correcta, de acuerdo al uso de la mezcla en el pavimento, como capa base, intermedia o de rodadura. Para esto, se le exige a la mezcla de áridos quedar comprendida en alguna de las bandas granulométricas especificadas en las Tablas 5.408.201.E a 5.408.201H del numeral 5.408.201 del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras.

Se distinguen granulometrías continuas o bien graduadas, donde el agregado fino llena los huecos entre el agregado más grueso, y granulometrías discontinuas. Los distintos tipos de mezclas se clasifican según el contenido de finos (bajo tamiz N°8) en:

- Fina: % finos = 50-65%
- Densa: % finos = 35-50%
- Semidensa: % finos = 28-42%
- Gruesa: % finos = 20-35%
- Abierta: % finos = 5-20%

Se requiere además que los áridos posean un porcentaje considerable de material chancado (dos o más caras fracturadas) con superficie áspera, para proveer a la mezcla asfáltica de un esqueleto mineral con una trabazón interna muy fuerte, que resista las cargas de tránsito que la solicitan (sin desplazamiento de la mezcla), y limitar también el contenido de pétreos que puedan presentar gran desgaste (pulimiento) o romperse (partículas lajeadas), y con eso variar la granulometría, durante el proceso de compactación, o por el mismo tránsito. Para tal efecto, se le exige a la mezcla de áridos cumplir los requisitos especificados en el numeral 5.408.201 del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras.

2.1.1.2. Cemento asfáltico tradicional

El asfalto puede encontrarse de forma natural (como rocas y lagos de asfalto), u obtenerse por la refinación del petróleo extraído de pozos. Básicamente el empleado en pavimentación se obtiene a partir del pitch asfáltico, que es el producto residual del proceso de destilación y refinación de los constituyentes del petróleo.

2.1.1.2.1. Propiedades químicas

El asfalto está compuesto primordialmente por moléculas complejas de hidrocarburos, aunque también contiene átomos de oxígeno, nitrógeno, azufre, sulfuro y otros elementos.

En condiciones normales, los hidrocarburos forman una solución coloidal de dos fases, en la que los hidrocarburos más pesados, denominados asfáltenos, están dispersos en las moléculas de hidrocarburos más ligeros, denominados maltenos. Los asfáltenos por su color negro y similitud con el polvo grueso de grafito, le proporcionan su color y dureza al asfalto. Los maltenos son líquidos viscosos y pegajosos compuestos de resinas y aceites que le proporcionan las propiedades aglutinantes al asfalto (su valor cohesivo).

La proporción de asfáltenos y maltenos en un ligante varía normalmente debido al proceso de envejecimiento o endurecimiento que sufre el asfalto en el tiempo. El envejecimiento produce cambios considerables en sus propiedades, que lo transforman en un material más rígido y con menor poder aglomerante. El envejecimiento del asfalto se produce por variadas y complejas reacciones de oxidación, volatilización y polimerización, principalmente, cuando este está expuesto a agentes ambientales como las altas temperaturas y el oxígeno. Durante la vida del asfalto, se pueden distinguir dos importantes procesos de envejecimiento:

- **Envejecimiento primario o de corto plazo:** Se produce desde la fabricación de la mezcla en planta, hasta el proceso de compactación. Se debe principalmente a las altas temperaturas a las que se somete el asfalto durante los trabajos de construcción de los concretos asfálticos. La volatilización es su causa principal (evaporación de los constituyentes más livianos del asfalto).
- **Envejecimiento secundario o de largo plazo:** Es el que sufre el asfalto durante la vida de servicio del pavimento. La oxidación es su causa principal (reacción del asfalto con el oxígeno).

2.1.1.2.2. Propiedades físicas

Las propiedades físicas del asfalto de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de caminos son:

- a. Durabilidad:** Es la capacidad del asfalto de mantener sus características originales cuando se expone a procesos normales de envejecimiento y degradación.
- b. Adhesión:** Es la capacidad del asfalto para quedar fijo al agregado en la mezcla, incluso en presencia de agua, tránsito y cambios bruscos de temperatura.
- c. Cohesión:** Es la capacidad del asfalto de mantener unidas y firmes en su posición a las partículas de agregado en la mezcla compactada.
- d. Susceptibilidad térmica:** Indica la sensibilidad de la consistencia del asfalto a los cambios de temperatura.
- e. Susceptibilidad a la duración de la carga:** La viscosidad del asfalto depende también de la duración de los esfuerzos a los que está sometido, de manera similar a lo que sucede con la temperatura. En efecto, a altas temperaturas (clima desértico o verano) y/o cargas estáticas o lentas (camiones moviéndose lento, intersecciones, etc.), el asfalto se comporta como un fluido viscoso que fluye rápidamente y cuya

deformación no es recuperable (pavimento propenso a sufrir ahuellamiento). Por el contrario, a bajas temperaturas (climas fríos o invierno) y/o cargas rápidas (camiones moviéndose rápido), el asfalto se comporta un sólido elástico cuya deformación es baja y recuperable (pavimento muy rígidos pueden ser susceptible al agrietamiento). Esta condición viscoelástica (semisólida) le concede a los asfaltos su capacidad de resistir altos esfuerzos instantáneos y solo fluir bajo la acción de cargas permanentes.

A nivel nacional, se utilizan casi exclusivamente los cementos asfálticos tradicionales del tipo CA 14 y CA 24, clasificados según grado de viscosidad absoluta (deben cumplir la especificación descrita en la Tabla 8.301.1a del Volumen N° 8 del Manual de Carreteras).

2.1.1.3. Cemento asfáltico modificado con polímeros

Se han logrado avances significativos al tratar el cemento asfáltico original con otras sustancias que permiten mejorar su comportamiento cuando es sometido a condiciones más exigentes, por ejemplo, climas extremos, tránsito de vehículos muy pesados, ambientes agresivos, solicitudes concentradas en áreas específicas, etc.

La modificación del asfalto consiste en la adición de polímeros a los asfaltos tradicionales con el fin de mejorar sus características reológicas. Estos modificadores se incorporan en el proceso de fabricación del cemento asfáltico. Los polímeros comúnmente usados son los elastómeros, dentro de los que destacan el SBS (Estireno-Butadieno-Estireno), SBR (Estireno-Butadieno-Rubber) y el SB (Estireno-Butadieno). El caucho de neumático es un material elastomérico también usado como modificador, cuyo uso es relativamente reciente.

La modificación de la reología del asfalto otorga las siguientes ventajas, frente a los asfaltos tradicionales:

- Aumento de la resistencia a la deformación permanente y a la rotura, en un rango más amplio de temperaturas, tensiones y tiempos de carga.
- Disminución de la susceptibilidad térmica, esto es, disminución de la fragilidad en tiempo frío (menos fisuramientos por efecto térmico a bajas temperaturas y fatiga por esfuerzos de tensión) y aumento de la cohesión en tiempo cálido (ligantes más viscosos aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación permanentes).
- Disminución de la susceptibilidad a los tiempos de aplicación de la carga.
- Mejora notable de la adhesividad de los áridos.

- Por otra parte, la reacción química asegura una alta estabilidad del producto, presentando una elevada inercia a agentes externos tales como sal, agua, radiación solar y al desgaste en el tiempo, por lo cual su vida útil aumenta.

A nivel nacional, los cementos asfálticos modificados con polímeros que se ocupan, deben cumplir los requerimientos exigidos para los asfaltos del tipo CA 60-80 y CA 80-100 (Referencia: Manual de Carreteras - Volumen N° 5, Tabla 5.408.202 A).

2.2. Mezclas asfálticas en caliente con incorporación de polvo de caucho de neumáticos fuera de uso (NFU)

La incorporación de polvo de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso (NFU) a una mezcla asfáltica convencional mejora sus prestaciones como material para carreteras, ya que el caucho vulcanizado al ser un polímero, modifica las propiedades reológicas del ligante de una manera similar, pero en menor grado, que las mezclas con asfalto modificado con polímeros nuevos.

2.2.1. Polvo de caucho

2.2.1.1. Neumáticos fuera de uso (NFU)

Los neumáticos son estructuras muy complejas elaboradas con más de doscientos componentes. El principal componente es el caucho, que es casi la mitad de su peso, y puede ser de dos tipos: natural o sintético. El caucho natural normalmente le proporciona elasticidad al neumático, mientras que el sintético lo que aporta es estabilidad térmica.

El caucho natural se obtiene a partir de un fluido lechoso de color blanco, conocido como látex, que corresponde a la savia de varias plantas específicas. La principal fuente comercial de látex son las euforbiáceas del género *Hevea*, que contienen entre un 30% a un 40% de caucho. Por otro lado, los cauchos producidos sintéticamente se obtienen por reacciones químicas, conocidas como polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados.

Ambos tipos de cauchos son polímeros elastoméricos, un material con la propiedad mecánica de poder sufrir mucha más deformación elástica bajo tensión que la mayoría de los materiales y regresar a su tamaño previo sin deformación permanente.

Durante la fabricación del neumático, los cauchos se someten al proceso de vulcanización consistente en entrelazar las cadenas de polímeros con moléculas de azufre mediante la acción de altas presiones y temperaturas. Los enlaces así formados son muy estables lo que hace que el proceso de desvulcanización sea difícil. Esta es la principal causa por la cual no es posible reciclar neumáticos desechados para la fabricación de neumáticos nuevos.

Otro componente de los neumáticos que entra en proporciones altas, es el negro de carbono, que sirve como carga de refuerzo y para mejorar la resistencia de los cauchos a la oxidación. El acero y material textil constituyen el tercer y cuarto componente en magnitud del neumático, con la misión de ser el esqueleto del mismo y soportar y transmitir las cargas y esfuerzos que se producen sobre él durante la circulación de los vehículos. El óxido de zinc, el azufre y otra serie de productos químicos, que actúan como catalizadores, plastificantes, adhesivos, etc., terminan de dar la composición al neumático.

La clasificación de los neumáticos se hace generalmente según el tipo de vehículos que los utiliza. Se ha estimado que un 80% de los neumáticos desechados proceden de automóviles o camionetas (peso aproximado de 8kg), un 20% de vehículos pesados (peso aproximado de 65kg), y alrededor del 1% restante son neumáticos especiales para motocicletas, aviones, equipos de construcción u otros.

En un neumático, las proporciones de los componentes pueden variar en función del tipo de neumático y del fabricante, aunque generalmente se aproximan a las que se exponen en la Tabla 2-1 (porcentajes en peso). Es importante señalar que el mayor porcentaje de caucho se encuentra en la banda de rodado y el mayor porcentaje de acero, en el anillo interno del neumático que se sujeta a la llanta (talón).

Tabla 2-1. Composición ponderal de los neumáticos en la Unión Europea¹

Material	Vehículo Turismo [%]	Vehículo Pesado [%]
Caucho	48	45
Negro de carbono y sílice	22	22
Metal	15	25
Textil	5	-
Óxido de zinc	1	2
Azufre	1	1
Aditivos	8	5

Fuente 2:1: Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas.

¹ La diferenciación entre neumáticos de turismo y camión es debida al distinto contenido de caucho, pero además se diferencian por las proporciones relativas de caucho natural y sintético. En los turismos el contenido de caucho natural es del orden del 65 % del caucho total y en los neumáticos de camión es aproximadamente del 72 %.



Figura 2-3. Principales componentes de un neumático.

2.2.1.2. Obtención del polvo de caucho

La utilización en mezclas asfálticas en caliente, precisa que el caucho reciclado esté en forma de polvo; un material constituido por partículas finas de caucho natural y sintético vulcanizado, de tamaños inferiores a 2.3mm, obtenido triturando los neumáticos fuera de uso hasta el tamaño deseado y separando los metales, tejidos (fibras textiles) y otras impurezas que puedan incorporar².

Las técnicas más utilizadas, son la trituración mecánica a temperatura ambiente y la trituración criogénica, a baja temperatura, y se realizan en plantas de reciclaje de neumáticos desechados, especialmente diseñadas para este propósito.

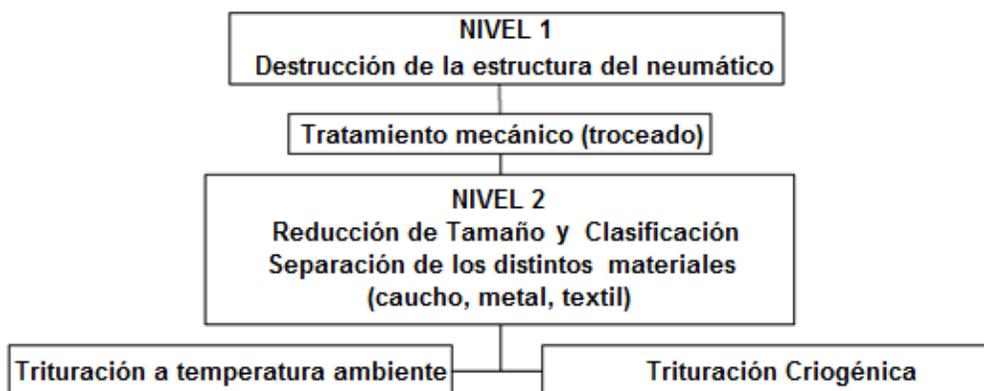


Figura 2-4. Etapas para la obtención del polvo de caucho.

² Definición según NCh 3258-2012, Mezclas asfálticas – Polvo de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso – Requisitos.

- **Tratamiento mecánico previo (troceado)**

Sea cual sea el método escogido para obtener polvo de caucho, previamente los neumáticos enteros deben pasar por un proceso de trituración mecánica para la disminución de su tamaño a trozos irregulares relativamente grandes de tamaños menores a 300mm.

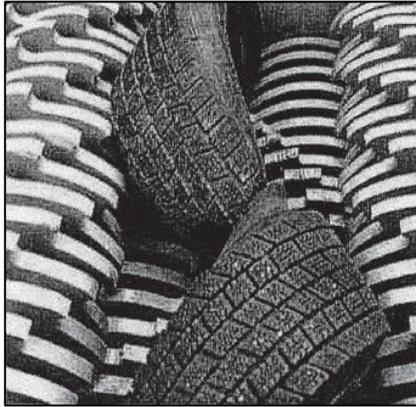


Figura 2-5. Trituración mecánica por acción de cuchillas.

En general, el troceado del neumático se realiza a temperatura ambiente a través de trituradoras formadas por dos o más ejes paralelos de cuchillas rotatorias, que giran a distintas velocidades para favorecer la incorporación del neumático. Las cuchillas de gran espesor, tienen en sus bordes unos salientes en forma de garfio que ayudan a la incorporación del neumático. La separación de los ejes define el tamaño de los trozos conseguidos, pudiendo realimentar los más gruesos para obtener tamaños inferiores.

- **Trituración Ambiental**

La trituración ambiental es un proceso netamente mecánico, donde los trozos de neumático son triturados a temperatura ambiente en sucesivas etapas, que dan como resultado partículas de caucho de distintos tamaños.

En líneas generales, las tecnologías de reducción de tamaño consisten en procesos de granulado, molienda y eventualmente pulverización, mediante una serie de granuladores y/o molinos dispuestos en cascada que van desintegrando los trozos de caucho para obtener partículas de caucho hasta el orden de los micrones.

Con el fin de dejar las partículas de caucho libres de material textil y metálico, presentes en altos contenidos, los fragmentos de acero son extraídos mediante electro-

imanes y las fibras textiles son separadas mediante corrientes de aire y equipos de aspiración.

La granulometría y el tamaño del producto son controlados mediante una serie de tamices ubicados dentro de la máquina, los cuales pueden ser cambiados para variar el producto final. En general, las partículas de caucho obtenidas se denominan granos, si su tamaño está comprendido entre 1mm y 10mm, y polvo, si su tamaño es inferior a 2.3mm. Finalmente, el caucho en sus distintas granulometrías, se clasifica de acuerdo al uso que se le va a dar.



Figura 2-6. Polvo de caucho de tamaño menor a 2mm (izq.) y 1mm (der.).

- **Trituración Criogénica**

El proceso de trituración criogénica requiere el enfriamiento previo de los trozos de neumático a través del uso de nitrógeno líquido u otros métodos para congelarlos. A temperaturas por debajo de los 200°C bajo cero, el caucho pierde su elasticidad característica, volviéndose frágil y fácil de desintegrar. Luego, para reducir su tamaño y convertirlos en elementos más finos, los trozos congelados pasan por un molino de impacto.

Finalmente, el material obtenido se seca, se separa de la fibra textil (por aspiración) y el metal (mediante imanes) y se clasifica según tamaño.

La forma de trituración de los NFU, determina la forma, textura y granulometría de las partículas de caucho y el contenido remanente de contaminantes metálico y textil, las cuales definen las propiedades del polvo de caucho obtenido, y por lo tanto, influyen en su reacción con el cemento asfáltico. En relación a este aspecto, cabe destacar que para las partículas con gran área superficial, como las conseguidas a través de la trituración ambiental; que tienen forma y textura irregular, la reacción con el ligante se produce en forma rápida, a diferencia de lo que ocurre con las partículas con baja área superficial obtenidas por la trituración criogénica, dado que al tener forma ovalada y superficies planas, disminuye el nivel de reacción con el asfalto.

2.2.1.3. Técnicas de incorporación en mezclas asfálticas

La incorporación de polvo de caucho proveniente de NFU a una mezcla asfáltica, se puede hacer de dos maneras, denominadas vía húmeda y vía seca. Ambos procedimientos se diferencian, además de la forma de ejecución, en el contenido de polvo de caucho que se utiliza para preparar la mezcla asfáltica. La denominación de los productos resultantes de ambos procesos de incorporación, se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2-2. Terminología asociada al uso de polvo de caucho en mezclas asfálticas.

Proceso	Producto	% de incorporación de polvo de caucho
Vía Húmeda	Asfalto modificado con polvo de caucho o Asfalto-Caucho	5-26% respecto al peso del cemento asfáltico
Vía Seca	Mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho	0.5-1.0% respecto al peso del árido

2.2.1.3.1. Proceso por Vía Húmeda

Consiste en el mezclado previo del polvo de caucho con el cemento asfáltico en un estanque con agitación a alta temperatura, para su posterior empleo como ligante en la mezcla asfáltica en caliente. En esta forma, el polvo de caucho actúa como un polímero modificador del cemento asfáltico y el producto obtenido, denominado comúnmente asfalto-caucho, es usado de la misma manera que un cemento asfáltico modificado convencional.

El procedimiento de fabricación por vía húmeda, puede ser realizado de dos maneras: En el primer caso, denominado Proceso en Refinería, el asfalto-caucho se elabora en la Planta productora de asfalto (Asfaltera), desde donde es transportado a la Planta Asfáltica para ser combinado con los áridos y producir la mezcla asfáltica. En el segundo caso, denominado “en terreno”, la modificación del asfalto se realiza en la misma Planta Asfáltica, para luego ser incorporado a los áridos en el proceso de mezclado.

En general, la mezcla de asfalto con polvo de caucho es muy viscosa, lo que dificulta su manipulación de manera estable (sin segregaciones). Para que el asfalto-caucho mantenga su consistencia uniforme, la mezcla debe estar en continua agitación y a alta temperatura, especialmente al ser almacenado y transportado. Esto también permite que se pueda descargar (trasegar) y bombear sin dificultades.

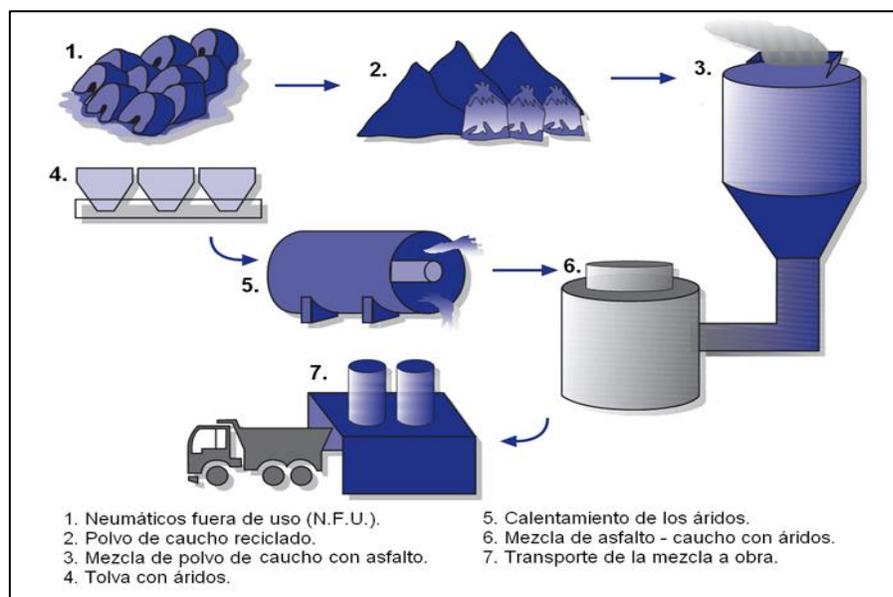


Figura 2-7. Proceso por vía húmeda.

- **Modificación del cemento asfáltico (Digestión):**

Cuando el polvo de caucho se incorpora a un asfalto a elevada temperatura, las partículas de caucho se reblandecen, absorben los componentes más ligeros del asfalto (aceites aromáticos) y se hinchan. Con el hinchamiento disminuye la distancia entre partículas y el ligante se hace más viscoso. Este fenómeno de hinchamiento se suele denominar digestión o maduración. El proceso de digestión, no es del tipo química, pues las partículas de caucho no se funden con el asfalto. El proceso se asimila a lo que sucede con una esponja seca y dura al sumergirla en agua, pues a medida que la esponja absorbe el agua, se hincha y ablanda.

En el caso de la vía húmeda, el principal parámetro usado para controlar el proceso de digestión es la viscosidad, que aumenta una vez que se agrega el polvo de caucho al asfalto, es por esta razón que debe ser chequeada a diferentes intervalos de tiempo durante la reacción. Una vez que el asfalto-caucho logra la viscosidad requerida para el proceso de mezclado (trabajabilidad), se incorpora a los áridos en el mezclador de la Planta asfáltica.

Las características del producto resultante de la mezcla de asfalto y polvo de caucho (grado de modificación del ligante), dependen de las características de ambos componentes; principalmente del tamaño, textura y proporción de las partículas de caucho y el tipo de cemento asfáltico, además de la temperatura y el tiempo de reacción de la mezcla y el grado de agitación mecánica durante este proceso. Las temperaturas elevadas, los largos tiempos de digestión y las partículas más pequeñas de caucho producen interacciones más rápidas.

- **Aplicaciones del asfalto modificado con polvo de caucho por vía húmeda**

El proceso de fabricación del asfalto modificado con polvo de caucho por vía húmeda, fue desarrollado en los años 60 en Arizona, por el ingeniero americano Charles McDonald, para su aplicación en tratamientos superficiales y bacheos. Sin embargo, actualmente, sus aplicaciones principales son en mezclas asfálticas en caliente básicamente en capas de rodadura (porcentajes de adición de polvo de caucho varían entre un 5 y un 26% respecto al peso del asfalto) y, en menor medida, en capas intermedias (experiencia internacional). También se ha utilizado como membranas antifisuras, tanto superficiales del tipo SAM (Stress Absorbing Membrane) o entre capas (riego de liga) del tipo SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer). Estos sistemas antifisuras suelen utilizarse en la reparación de pavimentos agrietados o en la nueva construcción de pavimentos semirrígidos (sobre pavimentos antiguos de hormigón), ya que permiten frenar o retrasar la aparición en superficie de grietas procedentes de las capas inferiores (reflexión de grietas).

- El procedimiento por vía húmeda para la elaboración del ligante asfalto-caucho se encuentra especificado en la norma ASTM D8-88. En base a ella, la Dirección de Vialidad ha establecido sus propias exigencias para los trabajos de construcción de las capas superficiales de pavimento confeccionadas con asfalto-caucho, las cuales se utilizaron en la construcción de los dos tramos de prueba llevados a cabo durante los años 2005 y 2006 en el país. En ella se establece que el porcentaje de adición del polvo de caucho, de tamaño máximo 2mm, es entre 18-24% con respecto al peso del cemento asfáltico. Además, se especifican los rangos de temperatura y tiempo para la reacción del asfalto y el caucho dentro del estanque (temperaturas entre 180-210° C por 1 a 4 horas).

2.2.1.3.2. Proceso por Vía Seca

El procedimiento de fabricación de la mezcla asfáltica modificada por vía seca consiste en introducir el polvo de caucho directamente en el mezclador de la Planta Asfáltica, como un componente más de la mezcla, sin embargo, se requiere mezclar primero éste con el árido para lograr su total reparto y aumentar así su temperatura, antes de añadir el cemento asfáltico.

En este proceso, el polvo de caucho actúa en parte como árido, pero sus partículas más finas interaccionan con el cemento asfáltico modificando sus propiedades y consiguiendo así mejorar el comportamiento de la mezcla asfáltica. Por eso, luego de mezclar el ligante con los agregados más el caucho, se le debe dar el tiempo a esta mezcla para que suceda el proceso de digestión. Este tiempo en obra, la mayoría de las veces está garantizado con el tiempo que demora el camión entre la Planta asfáltica al lugar de colocación del concreto asfáltico en terreno.

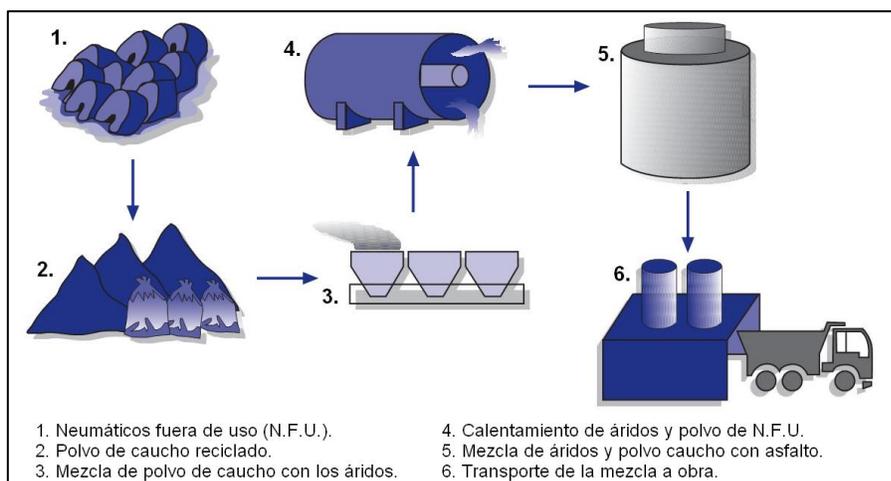


Figura 2-8. Proceso por vía seca.

- **Modificación de la mezcla asfáltica por vía seca:**

En el método por vía seca, el polvo de caucho incorporado funciona como un sistema de dos componentes dentro de la mezcla asfáltica, en el que las partículas más finas (principalmente las que pasan por el tamiz 0.5mm) interaccionan con el asfalto a elevada temperatura y modifican su reología mediante un proceso similar al de vía húmeda, y por otro lado, las partículas más gruesas, como su área específica es reducida y el periodo de interacción con el asfalto es limitado, la digestión con el ligante se desarrolla solo superficialmente, ya que no hay tiempo suficiente para que la digestión se desarrolle en toda su masa. De esta manera, las partículas gruesas de caucho se comportan como un árido elastomérico dentro del esqueleto pétreo y se crea una interfase asfalto/caucho que cohesiona ambos materiales.

De igual manera que en el proceso por vía húmeda, la calidad de la mezcla asfáltica resultante depende del proceso de digestión que prolifera desde la superficie de la partícula de caucho hacia su interior, y que será más rápida y efectiva mientras más fino sea el polvo de caucho, menor su proporción dentro de la mezcla asfáltica, y cuanto más elevada sea la temperatura de la mezcla y el tiempo que se mantenga ésta caliente durante el proceso de fabricación y puesta en obra.

Por ello es preciso, durante el diseño de la mezcla asfáltica modificada por vía seca, estimar cuales serán la temperatura y el tiempo de digestión mínimos para alcanzar el grado de digestión suficiente. Esto se puede hacer a través de ensayos en Laboratorio (limitando la resistencia al efecto del agua). El tiempo de curado de la mezcla es fundamental, ya que en caso de no realizarlo correctamente, no solo no se provoca la modificación del ligante, sino que se obtiene una mezcla de peores propiedades que una tradicional (se incrementan significativamente el contenido de vacíos de aire y el contenido de vacíos en los agregados).

- **Aplicaciones de mezclas asfálticas modificadas por vía seca**

El proceso de fabricación de la mezcla modificada con polvo de caucho por vía seca, fue desarrollado por una compañía sueca a finales de los años 60. Originalmente se diseñó como un sistema antihielo, en que se utilizaban principalmente partículas de caucho con tamaños relativamente gruesos para que se comportarán como áridos elásticos y se deforman en la superficie del pavimento por las sollicitaciones producidas por los vehículos, provocando la rotura del hielo cuando se comenzaba a formar.

La experiencia internacional se refiere principalmente al uso de estas mezclas asfálticas modificadas básicamente en capas de rodadura y, en menor medida, en capas intermedias. El proceso más habitual de incorporación es con polvo de caucho de tamaño máximo menor a 1mm y en proporciones inferiores a 1.0% respecto al peso total de los agregados de la mezcla.

Esta es una dosificación que reduce considerablemente los tiempos de espera entre la fabricación y la extensión y no obliga a prolongar excesivamente la compactación, proceso que también consume un tiempo que debe entenderse como de digestión del caucho, puesto que la mezcla permanece a más de 120°C (límite inferior del rango de temperaturas a las que se desarrolla la digestión, según bibliografía extranjera).

2.2.1.4. Ventajas técnicas

La adición de polvo de caucho a un asfalto (vía húmeda) o a una mezcla asfáltica (vía seca) tiene dos efectos principales:

- a. El polvo de caucho actúa como espesante, aumentando la viscosidad del ligante. En las mezclas asfálticas esto permite envolver los áridos con películas más gruesas de asfalto sin que se produzcan escurrimientos o exudaciones.
- b. La adición de polvo de caucho modifica la reología de los asfalto, de manera que aumentan su elasticidad y resiliencia a temperaturas elevadas y disminuye la susceptibilidad térmica.

El efecto conjunto de estas modificaciones permite conseguir las siguientes ventajas técnicas en las mezclas asfálticas, con la consecuente reducción de costos de mantenimiento y de interrupción del tráfico por reparaciones en el pavimento:

- Mayor resistencia a la deformación plástica acumulada (ahuellamiento) que las mezclas que utilizan cemento asfáltico tradicional, por su elevada viscosidad y resiliencia (ligante más elástico y viscoso a las temperaturas altas de servicio).

- Menor susceptibilidad térmica que las mezclas asfálticas fabricadas con cemento asfáltico tradicional.
- Mayor resistencia al agrietamiento, tanto por fatiga como por reflexión de grietas de las capas inferiores, que las mezclas fabricadas con cemento asfáltico tradicional, debido a los mayores contenidos de ligante que permiten estas técnicas.
- Mayor resistencia al envejecimiento y a la oxidación que las mezclas convencionales, por el potencial de utilizar mayores dotaciones de ligante y por la presencia de los antioxidantes del caucho de neumáticos.
- Otra ventaja adicional, desde la óptica de la seguridad vial, es que mantienen durante más tiempo el contraste con las marcas viales debido a que permiten introducir más asfalto y dura más el color negro de la superficie.

En la modificación de las mezclas asfálticas con polvo de caucho por vía seca se pueden conseguir ventajas semejantes, aunque en menor grado, que con los asfaltos modificados con polvo de caucho por vía húmeda. No obstante, las mezclas fabricadas por vía seca necesitan procedimientos específicos de fabricación y condiciones controladas de ejecución, por lo que precisan empresas adiestradas y de un control de calidad riguroso. Su interés radica en las siguientes ventajas adicionales:

- Se obtienen mezclas asfálticas más baratas que con los asfaltos modificados por vía húmeda.
- La tecnología se hace accesible a las empresas fabricantes de mezclas asfálticas y no sólo a las que fabrican asfaltos modificados. No requiere de un equipo especial de mezclado, solo un sistema de alimentación que proporcione la cantidad adecuada de caucho y que sea suministrada en el momento indicado (como un filler de aportación), antes que el ligante sea adicionado.

2.2.1.5. Ventajas ambientales

Las principales ventajas ambientales que se derivan del empleo de polvo de neumático en los materiales asfálticos por vía húmeda o vía seca son las siguientes:

- Se reciclan y reduce el volumen de neumáticos fuera de uso depositados en vertederos y en lugares desconocidos o no autorizados. El empleo de residuos permite a su vez ahorros en recursos naturales. En la técnica de las mezclas fabricadas por vía húmeda con porcentajes altos de incorporación de polvo de caucho (del orden del 20% respecto al peso del asfalto), se estima un aprovechamiento de 350 neumáticos de turismo por kilómetro de pista y por cada centímetro de espesor de mezcla asfáltica. Esta cifra es del orden de 75 a 150 en las otras técnicas, por vía húmeda o vía seca, con menores porcentajes de incorporación (entre 5 y 15% respecto al peso del asfalto).

- Su empleo en mezclas asfálticas permite reducir el nivel sonoro de rodadura. Las reducciones observadas son del orden de 3 a 4dB respecto a las mezclas asfálticas convencionales.
- Las mezclas asfálticas fabricadas con polvo de caucho pueden reciclarse en el futuro, cuando se agote su capacidad de servicio.

2.2.1.6. Propiedades físicas y químicas del polvo de caucho

Para que las mezclas asfálticas en caliente fabricadas por vía húmeda o seca tengan unas características adecuadas, se le debe exigir al polvo de caucho obtenido de la trituración de neumáticos fuera de uso, cumplir ciertas propiedades químicas y físicas. A nivel nacional, estas propiedades se encuentran especificadas en la Norma NCh 3258-2012 “Mezcla asfáltica- Polvo de caucho proveniente de los neumáticos fuera de uso- Requisitos”.

Las especificaciones sobre composición química tienen como función principal asegurar que el material proviene del reciclado de neumáticos fuera de uso. La normativa nacional exige que las cenizas no sobrepasen límites específicos. Por otro lado, las propiedades físicas que se especifican son las siguientes:

- La granulometría del polvo de caucho, que debe estar comprendida dentro de alguna de las bandas granulométricas indicadas en la Tabla 2-3. El tamaño máximo y la granulometría de las partículas son los parámetros que tienen gran influencia en el comportamiento de la mezcla.
- La densidad relativa de las partículas de caucho, determinada según UNE 53526, que debe estar comprendida en el intervalo 1.15 ± 0.05 . Esta propiedad permite identificar el caucho de neumáticos frente a otros tipos.
- El contenido de agua, que debe ser menor que 0.75%. Su determinación se tiene que realizar de acuerdo a la Norma NCh 1515, excepto en lo relativo a la temperatura de calentamiento en la estufa, que debe ser de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Se limita la humedad, porque puede producir espumas durante la fabricación.
- El contenido en contaminantes, como metales, impurezas y textiles, que se limita para evitar deterioros en los equipos de manejo y pérdidas de características en los productos fabricados (mezclas). Estas limitaciones son:
 - El contenido de materiales ferromagnéticos no debe ser mayor que 0.01% en peso del polvo de caucho.
 - El contenido de materiales textiles no debe ser mayor que 0.5% en peso del polvo de caucho.
 - El contenido de cualquier otro tipo de impurezas, tales como arena, madera, vidrio no debe ser mayor que 0.25% en peso del polvo de caucho.

Tabla 2-3. Bandas granulométricas especificadas para el polvo de caucho.

Tamiz		P - 1	P - 2	P - 3
ASTM	mm	% pasante	% pasante	% pasante
N° 8	2.30	100	-	-
N° 16	1.25	60 - 100	100	-
N° 30	0.63	30 - 80	40 - 100	100
N° 50	0.315	15 - 60	10 - 70	30 - 60
N° 100	0.160	0 - 40	2 - 40	0 - 30
N° 200	0.080	0 - 20	0 - 20	0 - 18

Fuente 2:2: Norma NCh 3258-2012.

2.3. Propiedades de las mezclas asfálticas

Las capas asfálticas, según su aplicación en el pavimento, como capa base, intermedia o de rodadura, deben cumplir propiedades específicas (independiente del tipo de mezcla del cual estén hechas), fundamentales para que el pavimento cumpla sus funciones. Las propiedades y los factores que las determinan, se detallan a continuación:

- **Estabilidad o Resistencia a la deformación permanente:**

Es la capacidad de una mezcla asfáltica compactada para resistir las cargas impuestas por el tránsito vehicular sin que se produzcan deformaciones permanentes. Esta propiedad depende principalmente de la cohesión de la mezcla y de la fricción interna entre las partículas de agregado.

La fricción interna está determinada por el tamaño, forma y textura del agregado. En términos generales, entre más gruesas, ásperas y angulosas sean las partículas de agregado, más alta será la estabilidad de la mezcla. Por otro lado, la capacidad cohesiva aumenta con la viscosidad y contenido del cemento asfáltico. En efecto, la cohesión en la mezcla se incrementa con la cantidad de ligante hasta un punto óptimo, después del cual el asfalto forma una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, que produce una pérdida de fricción entre estas (efecto lubricante).

- **Durabilidad:**

Es la capacidad de una mezcla asfáltica compactada para resistir la desintegración debido a los efectos del tránsito y los agentes atmosféricos. La capa superficial, por encontrarse en contacto con el sol, el aire y el agua, es la más afectada.

La propiedad de producir cohesión varía con el tiempo al perder el asfalto su poder ligante debido a la oxidación. Cuando el asfalto envejece, se torna frágil y quebradizo, lo cual permite la entrada de agua al interior de las películas de asfalto. Esto genera su despegue del agregado y la consecuente desintegración de la mezcla.

La durabilidad depende por sobre todo del contenido de vacíos de aire en la mezcla y el espesor de la película de asfalto. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire y causar deterioro. Por otro lado, las películas gruesas de asfalto no se envejecen tan rápido como lo hacen las películas de menor espesor, dado que se necesita un tiempo más largo para oxidar una mayor cantidad de asfalto.

- **Impermeabilidad:**

Es la resistencia de una capa asfáltica al paso de agua superficial hacia su interior o a las capas inferiores. Esta propiedad se relaciona con las propiedades químicas del agregado mineral (adherencia árido-ligante) y el contenido de vacíos.

- **Trabajabilidad:**

Es la facilidad con que una mezcla asfáltica puede colocarse y compactarse en terreno, sin que se generen segregaciones. Esta propiedad, depende de las características y granulometría del agregado, y del contenido y viscosidad del asfalto.

- **Flexibilidad:**

Es la capacidad de una capa asfáltica para acomodarse a los asentamientos graduales de las capas subyacentes, sin sufrir agrietamiento o fisuración. Una mezcla densamente graduada y con bajo contenido de asfalto es, en términos generales, menos flexible que una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto.

- **Resistencia al deslizamiento:**

Es la fuerza que se desarrolla en la superficie de contacto entre el neumático y el pavimento y que resiste el deslizamiento cuando el vehículo frena. Esta capacidad de la mezcla asfáltica es sumamente importante a nivel de seguridad, ya que no se debe perder adherencia entre el neumático y la superficie de rodamiento, en particular cuando esta está húmeda. Para evitar el resbalamiento, el neumático debe ser capaz

de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre la película de agua, en la superficie del pavimento (hidroplaneo).

Las características de la resistencia al deslizamiento de un pavimento, se puede definir considerando que la adherencia superficial está determinada por dos tipos de condiciones: Microtextura y Macrotextura.

La microtextura refleja las características del árido expuesto en la superficie, los cuales pueden presentar una textura de tipo áspera o pulida (correspondiente a una longitud de onda entre 0 a 0.5mm y amplitud entre 0.001mm y 0.5mm). La macrotextura en cambio, se refiere a la textura superficial del pavimento, proveniente del efecto conjunto de las partículas de agregado que sobresalen de la superficie (correspondiente a una longitud de onda entre 0.5mm y 50mm y amplitud entre 0.01mm y 20mm). En este caso, las propiedades de la macrotextura están dadas por el tipo de mezcla asfáltica que exista en la capa de rodadura, definida principalmente por la forma, tamaño máximo y granulometría de los agregados (distribución). Un agregado de textura áspera y una mezcla de graduación abierta, favorecen la resistencia al deslizamiento.

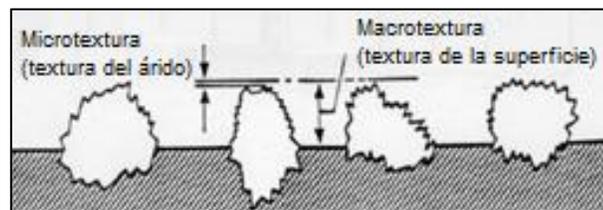


Figura 2-9. Micro y Macrotextura de la superficie de un pavimento.

- **.Resistencia a la fatiga:**

Es la capacidad de una mezcla asfáltica compactada de resistir las cargas causadas por el paso reiterado de vehículos, sin agrietamientos (tracción por flexión). Un pavimento con bajo contenido de asfalto o que se ha envejecido considerablemente, tiene menor resistencia a la fatiga.

- **Resistencia al fracturamiento por baja temperatura:**

Es la capacidad de la mezcla asfáltica compactada para no agrietarse en condiciones de baja temperatura. Depende principalmente de la rigidez del asfalto.

CAPÍTULO 3 MÉTODOS DE ENSAYE Y CONTROL

En este Capítulo, se describen los métodos de ensayo ocupados en el presente trabajo, y los procedimientos y parámetros de evaluación (especificaciones) correspondientes, a nivel de Laboratorio y de Terreno.

A nivel nacional, los métodos de ensayo para caracterizar las mezclas asfálticas y sus materiales componentes básicos, se encuentran descritos en el Volumen N° 8 del Manual de Carreteras (M.C.-V.8) y las especificaciones en el Volumen N° 5 (M.C.-V.5).

3.1. Trabajo en Laboratorio

3.1.1. Materiales constituyentes

La resistencia de cada capa asfáltica depende, además de su espesor, de la composición de la mezcla asfáltica que la define. Es por esta razón, que para su proceso de diseño, todos los materiales que la conforman deben cumplir requisitos (controles de calidad) para decidir si son aptos para la construcción del pavimento.

En el caso de las mezclas asfálticas en caliente convencionales, se controlan los áridos y el cemento asfáltico, y en el caso de las mezclas con incorporación de polvo de caucho por vía seca, se debe evaluar también este componente adicional.

3.1.1.1. Áridos

Los distintos tipos de áridos, de acuerdo al uso de la mezcla en el pavimento, deben cumplir requisitos específicos para que la mezcla que conforman cumpla su función. En este Capítulo, solo se señalan las propiedades competentes a la capa de rodadura, que es la capa asfáltica a analizar en este trabajo.

En la Tabla 3-1, se indican los procedimientos de ensayo y evaluación para los áridos que conforman la mezcla asfáltica de rodadura. Los procedimientos para cuantificar cada propiedad, se encuentran descritos en el Capítulo 8.200 del M.C.-V.8, y las especificaciones respectivas en 5.408.201 del M.C.-V.5.

Tabla 3-1. Ensayes de caracterización y requisitos para áridos en carpeta.

Ensaye	Unidad	Exigencia	Método
Partículas Chancadas	%	Mín. 90	8.202.6
Partículas Lajeadas	%	Máx. 10	8.202.6
Desgaste Los Ángeles	%	Máx. 25	8.202.11
Granulometría	-	Tabla 5.408.201F del M.C.-V.5	8.202.3
Densidad Real Seca	kg/m ³	Informar	8.202.20 8.202.21
Densidad Neta	kg/m ³	Informar	
Absorción	%	Informar	

Las distintas fracciones de áridos, que como mínimo son tres, se combinan, según proporciones específicas, para definir la granulometría de la mezcla, denominada granulometría de diseño. En particular, la granulometría a utilizar en este trabajo, para la capa de rodadura, debe cumplir la banda granulométrica de tipo semidensa IV-A-12 (especificaciones de Proyecto), la cual se señala en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Banda granulométrica semidensa IV-A-12.

Tamiz		Banda Granulométrica Semidensa IV-A-12
ASTM	mm	% pasante
3/4"	20	100
1/2"	12.5	80 – 95
3/8"	10	70 – 85
N° 4	5	43 – 58
N° 8	2.5	28 – 42
N° 16	1.25	-
N° 30	0.63	13 – 24
N° 50	0.315	8 – 17

Fuente 3:1: Tabla 5.408.201F del M.C.-V.5.

3.1.1.2. Cemento asfáltico

El cemento asfáltico debe ser caracterizado según diversas propiedades, que varían según el tipo de cemento asfáltico a emplear. En la Tabla 3-3, se indica la caracterización y evaluación pertinente al cemento asfáltico tradicional del tipo CA 24, que es el que se utiliza en este trabajo.

Los procedimientos de ensayo para cuantificar cada propiedad, se encuentran descritos en el Capítulo 8.302 del M.C.-V.8, y las especificaciones respectivas, se enuncian en 5.408.202 del M.C.-V.5.

Tabla 3-3. Ensayes de caracterización y requisitos para el CA 24.

Ensaye	Unidad	Exigencia	Método
Producto Original:			
Viscosidad a 60°C	Poises	≥ 2.400	8.302.15
Penetración, 100 gr, 25°C, 5 seg	0.1mm	Mín. 40	8.302.3
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min	cm	Mín. 100	8.302.8
Ensaye de la Mancha	% Xilol	Máx. 25%	8.302.7
Punto de Ablandamiento	°C	Informar	8.302.16
Índice de Penetración (Pfeiffer)	-	-1.5 a +1.0	8.302.18
Índice de Fraass (°C)	°C	Informar	8.302.17
Viscosidad Cinemática a135°C	Poises	Informar	8.302.13
Película Delgada Rotatoria:			
Pérdida por Calentamiento	%	Máx. 0.8	8.302.33
Viscosidad a 60°C	Poises	Informar	8.302.15
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min	cm	Mín. 100	8.302.33
Índice de Durabilidad	-	Máx. 3.5	Residuo/Original

Fuente 3:2: Tabla 8.301.1A del M.C.-V.8.

Respecto al cemento asfáltico envejecido, se lleva a cabo su caracterización completa; que incluye la del material tras el envejecimiento primario, simulado en el Horno de Película Delgada Rotatoria (PDR) y la correspondiente al envejecimiento secundario, simulado en la Cámara de Envejecimiento a Presión (PAV).

En el ensayo PDR, una muestra de asfalto original es sometida durante 75 minutos a una temperatura de 163°C con inyección de aire. En el PAV, la muestra previamente envejecida en el Horno PDR, se envejece a una temperatura determinada (del orden de 100°C) y a una presión de trabajo de 305psi durante 20 horas.

3.1.1.3. Polvo de caucho

La granulometría del polvo de caucho de NFU, debe estar comprendida dentro de alguna de las bandas granulométricas especificadas en la Norma NCh 3258-2012 "Mezcla asfáltica- Polvo de caucho proveniente de los neumáticos fuera de uso-Requisitos". Estas se indican en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4. Bandas granulométricas especificadas para el polvo de caucho.

Tamiz		P - 1	P - 2	P - 3
ASTM	mm	% pasante	% pasante	% pasante
N° 8	2.30	100	-	-
N° 16	1.25	60 - 100	100	-
N° 30	0.63	30 - 80	40 - 100	100
N° 50	0.315	15 - 60	10 - 70	30 - 60
N° 100	0.160	0 - 40	2 - 40	0 - 30
N° 200	0.080	0 - 20	0 - 20	0 - 18

Fuente 3:3: Norma NCh 3258-2012.

3.1.2. Diseño de mezclas asfálticas en caliente

Básicamente, lo que se busca en el diseño de mezclas asfálticas, en este caso particular para capa de rodadura, es obtener el mejor balance entre estabilidad, durabilidad, trabajabilidad e impermeabilidad, además de otras propiedades necesarias de acuerdo a su función en el pavimento.

Para tal efecto, se determina el contenido óptimo de asfalto, para una combinación particular de áridos, aditivos y otros materiales que puedan incorporarse como agregado, que le otorgue a la mezcla asfáltica las propiedades requeridas. El óptimo de asfalto depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como su capacidad de absorción y granulometría (entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y, mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir todas las partículas). Es necesario además, que todas las mezclas contengan cierto porcentaje de vacíos para absorber la consolidación producto del amasado del tránsito (sin exudaciones).

El proceso de dosificación y los requisitos exigidos (especificaciones) varían según el tipo de mezcla asfáltica a diseñar.

3.1.2.1. Mezclas asfálticas convencionales

A nivel nacional, la metodología oficial para determinar el contenido óptimo de asfalto en las mezclas asfálticas en caliente convencionales (dosificación de asfalto), es el Método Marshall. Este método es aplicable sólo a mezclas que contengan agregados con tamaño máximo absoluto igual o inferior a 25mm (1”).

Este procedimiento de diseño se encuentra descrito en 8.302.47 del M.C.-V.8, y requiere la confección de probetas, cuyo procedimiento de preparación y ensayo se

describe en 8.302.40 del M.C.-V.8. Un breve resumen del método se presenta a continuación:

- **Confección de las probetas Marshall (8.302.40 del M.C.-V.8):**

El desarrollo del método implica la confección de una serie de probetas cilíndricas normalizadas de 63.5mm de altura y 101.6mm de diámetro, a las cuales se les incorporan diferentes porcentajes de ligante. Las probetas con estas dimensiones reciben la denominación de probetas Marshall.

Para obtener las dimensiones requeridas en las probetas, se realiza la mezcla con 1100g de áridos según la dosificación de diseño. Suelen utilizarse al menos cinco contenidos de cemento asfáltico (porcentaje referido al peso del agregado), variando uno y otro en 0.5 puntos porcentuales y con al menos dos contenidos de asfalto bajo y sobre el óptimo esperado. Para cada contenido de ligante, se deben fabricar a lo menos tres probetas.

Las probetas se preparan de acuerdo a un procedimiento específico de calentamiento, mezclado y compactación. Las temperaturas de mezclado y de compactación dependen del cemento asfáltico que se utilice para fabricar la mezcla asfáltica, y se definen según el rango de viscosidades necesarias para realizar tales procesos. La temperatura de mezclado se define como la temperatura a la que se debe calentar el asfalto para producir una viscosidad de $170 \pm 20\text{cSt}$ y la de compactación, la que produce una viscosidad de $280 \pm 30\text{cSt}$.

La compactación dentro de los moldes se realiza por impacto a través del martillo de compactación Marshall. Este es un dispositivo de acero, de base plana y circular de 100mm de diámetro, con un peso de 4.54kg, construido de modo de obtener una altura de caída de 18". Las probetas se compactan con una energía de compactación de 75 golpes por cara, o como se especifique.



Figura 3-1. Martillo de compactación Marshall.

- **Procedimiento de ensayo (8.302.40 del M.C.- V.8) y determinación del contenido óptimo de asfalto (8.302.47 del M.C.-V.8):**

Los dos aspectos principales de este método de diseño, son el análisis volumétrico (densidad-huecos) y el ensayo de estabilidad y flujo de las probetas compactadas. Para tal efecto, después que se ha determinado la densidad de cada una de las probetas, de acuerdo al método 8.302.38 del M.C.-V.8, y su contenido de huecos de aire, según 8.302.47 punto 4.7 del M.C.-V.8, se procede a ensayarlas a una temperatura de 60°C, para determinar su estabilidad y fluidez (8.302.40 del M.C.- V.8).

La estabilidad es la resistencia máxima en Newton a la deformación plástica de una probeta a 60°C cuando es cargada en su manto lateral usando el equipo Marshall. Esta prensa permite aplicar una carga a una velocidad de deformación constante de 50.8mm/min, la cual se le transmite a la probeta a través de dos mordazas semicirculares, una inferior y otra superior, que rodean su manto cilíndrico. La fluidez es la deformación en cuartos de milímetros (0.25mm) que se produce desde el inicio de la carga hasta llegar a la carga máxima.



Figura 3-2. Prensa Marshall y mordazas de carga.

Para definir el óptimo de asfalto, es necesario previamente conocer el contenido de huecos de aire, la estabilidad y la densidad para cada serie de probetas, conformada con un mismo contenido de asfalto (cinco series). Los valores de estas propiedades se obtienen como el promedio de los valores individuales de las tres muestras que conforman el grupo.

El contenido óptimo de asfalto referido al peso del agregado (% r.a.), se determina promediando los porcentajes de ligante en donde se alcanza la densidad máxima (P_b1), la estabilidad máxima (P_b2) y un porcentaje de vacíos de aire de 5% (P_b3), valores definidos en la Figura 3-3:

$$\text{Contenido óptimo de asfalto} = \frac{(P_b1 + P_b2 + P_b3)}{3} [\% \text{ r. a.}]$$

Ecuación 3-1

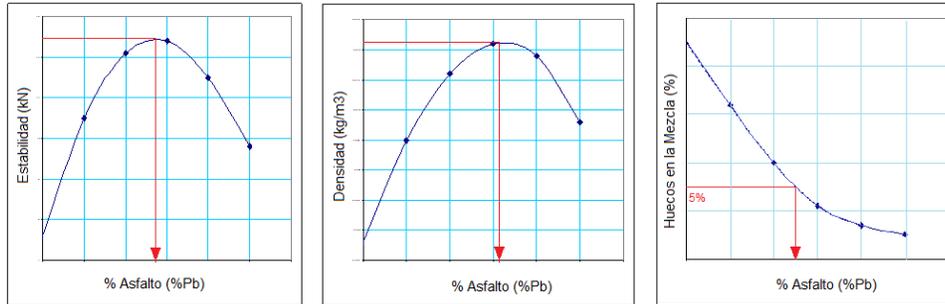


Figura 3-3. Resultados del análisis Marshall: Estabilidad, Densidad y Huecos.

Finalmente, se determinan las propiedades Marshall, definidas bajo el contenido óptimo de asfalto, que caracterizan a la mezcla asfáltica diseñada. Estas propiedades son principalmente la densidad, estabilidad, fluidez, huecos de aire (V_a) y vacíos en el agregado mineral (VAM). Este último parámetro y otros más requeridos, se determinan de acuerdo a 8.302.47 punto 4.1 al 4.8 del M.C.-V.8.

- **Evaluación de la mezcla asfáltica en Laboratorio (controles de calidad):**

Para la evaluación de la mezcla asfáltica diseñada para la capa de rodadura, los requisitos necesarios, relativos a las propiedades Marshall bajo el óptimo de asfalto, son los especificados en 5.408.203 M.C.-V.5, y se indican en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5. Requisitos para mezclas asfálticas tradicionales en capa de rodadura (ensayo Marshall).

Estabilidad [N]	Mín. 9000
Fluencia [0.25 mm]	Mín. 8 – Máx. 16
Huecos en la Mezcla [%]	Mín. 4 – Máx. 6
VAM [%]	Mín. 14

3.1.2.2. Mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho por vía seca

El diseño de una mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho por vía seca representa más dificultad que una mezcla asfáltica convencional debido a la mayor cantidad de parámetros que se deben determinar y a que todos están interrelacionados (variables que definen el proceso de digestión).

En efecto, dado que la incorporación de caucho a una mezcla modifica en cierto grado las propiedades del asfalto según las condiciones en que se ejecute el proceso de digestión del caucho, se hace prioritario definir las condiciones para efectuar este proceso de manera efectiva. Así, a partir de la dosificación de áridos y polvo de caucho, de acuerdo a sus respectivas granulometrías, se deben determinar una temperatura y un tiempo de digestión mínimos.

3.1.2.2.1. Procedimiento para la confección de probetas

El procedimiento para preparar probetas difiere del empleado para una mezcla convencional por el proceso de digestión al que se debe someter la mezcla con incorporación de polvo de caucho. Las etapas a seguir son las siguientes:

- a. Establecer los porcentajes de polvo de caucho y asfalto que se van a utilizar, referidos al peso del agregado, y el tiempo y la temperatura a la que se llevará a cabo el proceso de digestión. Estos parámetros se definen mediante la evaluación de la resistencia conservada a la acción del agua, la cual puede ser determinada mediante alguno de los dos métodos equivalentes siguientes: el ensayo de Inmersión-Compresión (a 25°C) o el ensayo de Sensibilidad al agua (Tracción indirecta tras inmersión) a 15°C. Los procedimientos de ensayo y las especificaciones correspondientes se encuentran descritos, respectivamente, en las Secciones 3.1.2.2.2 y 3.1.2.2.3 de este Capítulo.
- b. Combinar las distintas fracciones de áridos para obtener la granulometría proyectada (granulometría de diseño).
- c. Calentar los agregados en horno a la temperatura de mezclado y pesar la cantidad de polvo de caucho a utilizar. La temperatura de mezclado se fija igual a la temperatura de digestión.
- d. Mezclar los agregados calientes con la cantidad de caucho que corresponda y colocarlos en horno a la temperatura de digestión por aproximadamente 5 minutos para que el caucho aumente su temperatura.
- e. Adicionar a la mezcla de agregados con caucho, el asfalto previamente calentado a la temperatura de digestión, y mezclar por 2 a 3 minutos.
- f. Colocar la mezcla asfáltica en horno para el proceso de digestión, durante el tiempo y a la temperatura definidos con anterioridad.
- g. Retirar la mezcla del horno y remover el material.
- h. Compactar la mezcla caliente en moldes precalentados. La compactación se lleva a cabo a una temperatura 10°C más baja que la de digestión y según el procedimiento de compactación correspondiente al método que se esté llevando a cabo.
- i. Dejar reposar por 24 horas antes de extraer la probeta del molde.
- j. Remover la probeta a temperatura ambiente.

3.1.2.2.2. Ensayo de Inmersión – Compresión

El ensayo de inmersión – compresión permite determinar la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua sobre mezclas asfálticas compactadas. Esta pérdida se representa mediante un índice numérico denominado “Índice de resistencia conservada”, obtenido al comparar el promedio de las resistencias a compresión simple de probetas secas y probetas duplicadas sometidas a la acción del agua. El procedimiento de ensayo se realiza según las normas españolas que se señalan a continuación:

- NLT-161/98 “Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas”, y
- NLT-162/84 “Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactadas (Ensayo de Inmersión – Compresión)”.

La norma NLT-161, describe la metodología para la confección de las probetas y la determinación de su resistencia a compresión simple, mientras que la norma NLT-162, describe el procedimiento de acondicionamiento al que se deben someter cada grupo de probetas (al aire o al agua) y la determinación del Índice de resistencia conservada de la mezcla.

Para este ensayo, se ocupan diez probetas cilíndricas de altura y diámetro iguales a 101.6mm, cuya compactación es por compresión. La compactación se realiza mediante la acción de un doble émbolo, a carga creciente y velocidad uniforme, hasta alcanzar una carga máxima de compresión de 170kN (21MPa).



Figura 3-4. Conjunto de compactación.

Para el acondicionamiento de las probetas antes del ensayo, estas se deben dividir en dos grupos de cinco, de manera que la densidad relativa media de cada grupo sea aproximadamente la misma.

Las probetas acondicionadas en seco, se mantienen al aire (en un horno regulado) durante veinticuatro horas y luego en un baño de agua a 25°C durante dos horas más. El segundo grupo, acondicionado en húmedo, se sumerge bajo agua a una temperatura controlada de 60°C durante veinticuatro horas, una vez que se cumple el tiempo, se retira del baño y se mantiene por dos horas a temperatura ambiente y finalmente, se sumerge nuevamente bajo agua a 25°C por dos horas más.

Tras el respectivo acondicionamiento, se procede a ensayar cada grupo a compresión axial simple, a una velocidad de deformación constante de 5.08mm/min. Para cada probeta, la resistencia a compresión se obtiene dividiendo la carga máxima obtenida en el ensayo por el área de su sección transversal (81.1cm²).

Finalmente, luego de obtener el valor de las resistencias a compresión simple del grupo acondicionado en seco (R1) y el acondicionado en húmedo (R2), calculado en cada caso como promedio de las resistencias de las cinco probetas que conforman el grupo, se procede a determinar el índice de resistencia conservada de la mezcla (IRC) con la siguiente expresión:

$$IRC = \frac{R_2}{R_1} [\%]$$

Ecuación 3-2

- **Exigencia para mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho:**

Para la estimación de las condiciones de digestión de las mezclas asfálticas modificadas por vía seca, se toma como referencia la especificación española para mezclas asfálticas en caliente definida en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), publicados el año 2004 en la Orden FOM/891/2004. En esta norma se exige que la resistencia conservada a la acción del agua mediante el ensayo de inmersión-compresión, tenga un valor mínimo de 75%.

Tabla 3-6. Requisito de resistencia conservada por ensayo de inmersión-compresión para mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho.

Ensayo de Inmersión - Compresión	Exigencia
Resistencia Conservada [%]	Mínimo 75%

3.1.2.2.3. Ensayo de Sensibilidad al agua

El ensayo de sensibilidad al agua, de igual manera que el ensayo de inmersión-compresión, evalúa el efecto de la acción del agua en la cohesión de una mezcla asfáltica, sin embargo, emplea una metodología de ensayo diferente para la determinación del índice de resistencia conservada.

En este caso, la resistencia conservada de la mezcla se obtiene de comparar las resistencias a tracción indirecta de dos grupos de probetas cilíndricas equivalentes, un grupo mantenido en seco a temperatura ambiente y el otro sometido un proceso de saturación y de inmersión acelerada en agua. El procedimiento de ensayo se realiza bajo las normas europeas que se señalan a continuación:

- UNE-EN 12697-12:2006 “Determinación de la sensibilidad al agua de probetas de mezcla bituminosa”, y
- UNE-EN 12697-23:2003 “Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas de mezcla bituminosa”.

La primera norma, define las condiciones de compactación de las probetas y su acondicionamiento, en húmedo y en seco, además de la determinación del Índice de resistencia conservada de la mezcla, mientras que la segunda norma, describe el procedimiento de ensayo para determinación la resistencia a tracción indirecta.

El ensayo requiere la confección de mínimo seis probetas cilíndricas del tipo Marshall, de diámetro 101.6mm y espesor 63.5mm, compactadas por impacto mediante el martillo de compactación pero con 50 golpes por cara. Este número de golpes es el necesario para que la probeta tenga la densidad y el porcentaje de huecos que se espera tenga la mezcla en terreno, dada por el 97% de la densidad Marshall de diseño (compactada con 75 golpes por cara)³.

El procedimiento consiste en dividir las seis probetas en dos grupos de tres, de manera que la densidad media y las longitudes medias de cada grupo, sean aproximadamente las mismas (las densidades de ambos grupos no deben diferir en más de 30kg/m³ y las diferencia en las dimensiones no deben exceder los 5mm).

Para el acondicionamiento, un grupo se mantiene en seco a una temperatura ambiente de 20 ± 5°C, mientras que el otro grupo se somete a una saturación en agua

³ Para realizar este ensayo el método UNE-EN 12697-12 recomienda solo 25 golpes por cara, sin embargo se ha comprobado que con este número de golpes no se alcanza una compactación superior al 97% respecto de la densidad Marshall. Además, la especificación española referida a este ensayo (Orden Circular 24/2008. PG-3, Artículos 542 y 543), se basa en probetas confeccionadas con 50 golpes por cara.

aplicando vacío hasta una presión de 6.7kPa durante 30 minutos y posteriormente las probetas son mantenidas en inmersión en un baño de agua a una temperatura de 40°C durante un periodo comprendido entre 68 y 72 horas.



Figura 3-5. Probetas en saturación al vacío y probetas en baño de agua.

Posteriormente, las probetas se proceden a ensayar a tracción indirecta a la temperatura de ensayo de 15°C⁴ (revisar método en Sección 3.1.3.2.1). Para esto, ambos grupos se deben acondicionar durante 2 horas como mínimo a la temperatura señalada; las probetas húmedas se colocan directamente en un baño de agua y las probetas secas se introducen a una cámara de aire controlada mediante un termostato.

El ensayo a tracción indirecta se realiza con la Prensa Marshall, que permite aplicar una carga de compresión a una velocidad de deformación constante de $50 \pm 2\text{mm/min}$. Esta debe ir equipada adicionalmente con el dispositivo para la instalación de la probeta, denominado Prensa Lottman, que permite cargar longitudinalmente la probeta, según su plano diametral vertical. El dispositivo consta principalmente de dos barras metálicas a través de las cuales se aplica la carga. La probeta se ensaya según la disposición señalada en la Figura 3-6, hasta alcanzar la carga diametral de compresión máxima.

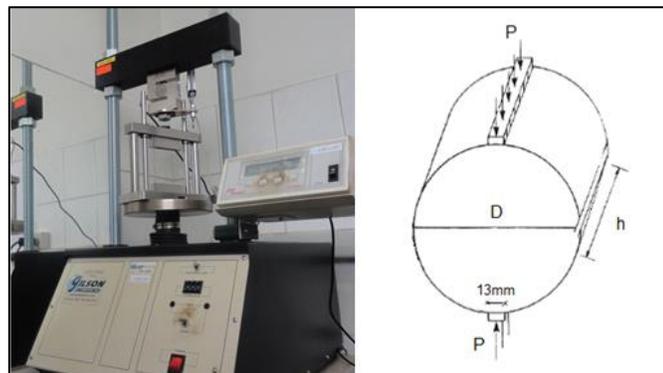


Figura 3-6. Prensa Marshall equipada con bastidor de ensayo (prensa Lottman).

⁴ En el método de ensayo UNE-EN 12697-12 se indica que la temperatura de ensayo puede estar comprendida entre 5°C y 25°C, recomendándose 25°C. Sin embargo, en las especificaciones españolas, de los Artículos 542 de la Orden Circular 24/2008 PG-3, se estipula que la temperatura de ensayo debe ser 15°C.

La resistencia a la tracción indirecta de cada probeta (ITS) se calcula según la siguiente expresión:

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot h}$$

Ecuación 3-3

Dónde:

ITS [MPa]. : Resistencia a la tracción indirecta de la probeta.

P[N]: Carga máxima.

D[mm]: Diámetro medio de la probeta.

h[mm]: Altura media de la probeta.

Luego, la resistencia a tracción indirecta tras inmersión de la mezcla asfáltica, también denominada resistencia conservada por tracción indirecta (ITSR), se calcula como la razón entre el promedio de las resistencias a tracción indirecta de las probetas acondicionadas en húmedo (ITS_w) y las probetas acondicionadas en seco (ITS_d), como se indica en la Ecuación 3-4.

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} [\%]$$

Ecuación 3-4

- **Exigencia para mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho:**

Para la estimación de las condiciones de digestión de las mezclas asfálticas modificadas por vía seca, se toma como referencia la especificación española para mezclas asfálticas en caliente definida en la Orden Circular 24/2008. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3): Artículo: 542 - Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso.

La especificación limita el índice de resistencia conservada por ensayo de tracción indirecta realizado a 15°C, a un valor mínimo de 85% para capa de rodadura. Se especifica también que la compactación de las probetas debe efectuarse con 50 golpes por cara.

Tabla 3-7. Requisito de resistencia conservada por ensayo de tracción indirecta para mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho.

Ensayo de Tracción indirecta (compactación de probetas con 2*50 golpes)	Exigencia en capa de rodadura
Resistencia Conservada a 15°C [%]	Mínimo 85%

3.1.3. Caracterización de mezclas asfálticas

Mediante ensayos de laboratorio, se caracterizan los distintos tipos mezclas asfálticas según diversas propiedades mecánicas.

3.1.3.1. Módulo Resiliente por compresión diametral

El módulo resiliente representa el módulo elástico de una mezcla asfáltica luego de aplicar cargas cíclicas sobre ella (método no destructivo de medición), bajo condiciones controladas de temperatura. Para determinar su valor, se sigue el método descrito en la norma europea UNE-EN 12697-26: 2006 “Mezclas bituminosas, Métodos de ensayos para mezcla bituminosa en caliente, Parte 26: Rigidez”, aplicando el ensayo de tracción indirecta según su anexo C: “Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY)”.

El método de ensayo es aplicable a probetas cilíndricas de diferentes diámetros y espesores, fabricadas en Laboratorio o extraídas como testigos del pavimento. Se requieren mínimo tres probetas para caracterizar la rigidez de una mezcla asfáltica a una temperatura específica. El módulo resiliente característico se obtiene como el promedio de los valores individuales de las probetas. El equipo de ensayo se muestra en la Figura 3-7.



Figura 3-7. Equipo de ensayo para determinación de módulo resiliente.

El procedimiento consiste en someter la probeta a impulsos de carga repetidos a lo largo del diámetro vertical alternados con periodos de descanso (la carga debe tener una forma de una onda de medio seno). Este ensayo entrega el valor máximo de la carga vertical aplicada y la amplitud de la deformación horizontal obtenida durante el ciclo de carga, con lo que se calcula el módulo de rigidez del material sometido a ensayo.

Durante el ensayo se deben controlar los tiempos de carga. El tiempo de subida a partir del comienzo del impulso de carga debe ser de 124 ± 4 ms. El valor de la carga máxima se debe ajustar para alcanzar una deformación máxima de referencia de 0.005% el diámetro de la probeta y el periodo de repetición de los impulsos debe ser de 3.0 ± 0.1 s.

La amplitud de la deformación diametral horizontal se exhibe en la Figura 3-8. Las deformaciones que se producen en este ensayo se dividen en resilientes o elásticas, que son de recuperación instantánea, y deformaciones plásticas que permanecen después de finalizado el esfuerzo deformador. La teoría señala que las deformaciones permanentes disminuyen a medida aumentan los ciclos, llegando a un estado en donde prácticamente desaparecen y toda la deformación es recuperable. En ese momento se tiene un comportamiento resiliente en las muestras.

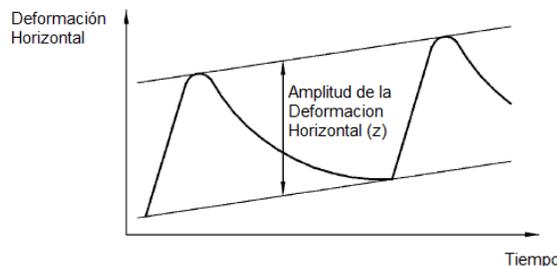


Figura 3-8. Amplitud de la deformación.

Se determina el cálculo del Módulo de Rigidez aplicando la siguiente fórmula:

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

Ecuación 3-5

En que:

Sm [MPa] = Módulo de Rigidez medido.

F [N] = Valor máximo de la carga vertical aplicada.

z [mm] = Amplitud de la deformación obtenida para cada ciclo de carga.

h [mm] = Espesor medio de la probeta.

v = Coeficiente de Poisson. Se asume 0.35.

- **Equipo de ensayo:** El equipo capaz de reproducir esta configuración de carga y de deformación es el Nottingham Asphalt Tester NU – 10 (NAT), desarrollado por la compañía Cooper Research Technology Limited. El NAT es un equipo servo-neumático que posee un pistón (actuador) capaz de aplicar cargas de compresión, permitiendo la aplicación de pulsos y cargas de tipo sinusoidal, además de una cámara reguladora de temperatura. El NAT permite realizar el ensayo sobre probetas o testigos de 100 o 150mm, con un espesor ideal de 60 a 70mm pero se pueden utilizar espesores de 30mm a 80mm, y en un amplio rango de temperaturas.

3.1.3.2. Resistencia a Tracción indirecta (compresión diametral)

Para determinar la resistencia a tracción indirecta de mezclas asfálticas, también conocida como resistencia a compresión diametral, se siguen dos metodologías de ensayos descritos en las siguientes normas:

3.1.3.2.1. Ensayo según UNE-EN 12697-23

Este método de ensaye se ejecuta bajo la norma europea UNE-EN 12697-23: 2003 “Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas de mezcla bituminosa”, y es el mismo ocupado para el ensayo de Sensibilidad al agua de las probetas acondicionadas en seco, de acuerdo a UNE-EN 12697-12.

Este ensayo permite la determinación de la resistencia a tracción indirecta (ITS) de probetas cilíndricas tipo Marshall compactadas con 50 golpes por cara, y consiste en la aplicación de una carga diametral de compresión, a lo largo de la dirección del eje de la probeta, a una velocidad constante de deformación de 50 ± 2 mm/min. El ensayo se debe realizar a una temperatura comprendida entre 5°C y 25°C, para lo cual las probetas se acondicionan durante 2 hrs. en una cámara de aire controlada mediante termostato.

Esta configuración de carga provoca un estado de tensiones en la probeta, en donde el esfuerzo de tracción es relativamente uniforme en todo su plano diametral vertical. La resistencia a la tracción indirecta de una probeta se calcula mediante la Ecuación 3-3, la cual determina el esfuerzo a tracción máximo en función de la carga máxima aplicada (rotura de la probeta) y de las dimensiones de la muestra.

Con este ensayo se obtiene una forma de caracterizar la cohesión de una mezcla asfáltica, pues la mayor oposición a la falla la presenta la unión del asfalto con los agregados pétreos. Para la determinación de la resistencia a tracción indirecta representativa de la mezcla, se requieren mínimo tres probetas. Este valor se obtiene como el promedio de las resistencias individuales.



Figura 3-9. Bastidor para ensayo de tracción indirecta (prensa Lottman).

El ensayo de tracción indirecta reproduce el estado de tensiones en la fibra inferior de la capa asfáltica y permite cuantificar la falla provocada por tracción.

3.1.3.2.2. Ensayo según NLT-346

Este método de ensayo se ejecuta bajo la norma española NLT-346/90 “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas”.

El procedimiento de ensayo es el mismo descrito anteriormente, según la norma europea, solo varían la temperatura de ensayo y las condiciones de acondicionamiento, dado que las probetas se acondicionan durante 6 horas en un baño de agua a 25°C. Dado que el método no especifica la cantidad de golpes para la compactación de las probetas Marshall, se opta por realizarla con 75 golpes por cara.

3.1.3.3. Ensayo de Ahuellamiento bajo agua

El ahuellamiento en los pavimentos flexibles es un deterioro con manifestación superficial, causado por el comportamiento plástico de los materiales, con deformaciones irreversibles, que altera significativamente el nivel de servicio de la estructura. En este trabajo en particular, se estudia en Laboratorio el comportamiento de las mezclas asfálticas en relación a este fenómeno, mediante el ensayo de ahuellamiento realizado en un equipo conocido como Rueda de Hamburgo, y cuyo procedimiento de ensayo se encuentra descrito en la norma americana AASHTO T324-04 “Hamburg Wheel-Track of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA)”.

La Rueda de Hamburgo consta básicamente de dos ruedas de acero cargadas (la carga aplicada es de 705N) dispuestas de manera paralela, que permiten el ensayo de dos muestras simultáneamente. La rueda se desliza hacia adelante y hacia atrás a

lo largo de la superficie de la probeta, a una frecuencia de paso de aproximadamente 50 pasadas por minuto (25 ciclos por minuto).

El método de ensayo es aplicable a probetas de variadas dimensiones y formas. Se opta por ensayar las muestras con una configuración en forma de “8”, según se presenta en la Figura 3-10, la cual está conformada por dos probetas cilíndricas de diámetro 150mm y espesor 60mm, compactadas mediante un compactador giratorio. Las probetas van dispuestas en un sistema de fijación con adaptadores, que restringen el desplazamiento de las muestras durante la prueba.



Figura 3-10. Disposición en forma de “ocho” con probetas cilíndricas.

El ensayo consiste en someter a la muestra al paso cíclico de la rueda en condiciones sumergidas en agua, midiéndose de manera continua, la profundidad de la deformación producida (huella) en función del número de pasadas de la rueda. La temperatura para el baño de agua puede estar comprendida entre 25°C a 70°C, pero la más común es 50°C. Existen dos condiciones de término de ensayo, prevaleciendo la que ocurre primero; una es alcanzar las 20000 pasadas de rueda (10000 ciclos de ida y vuelta) y la otra es alcanzar la profundidad de ahuellamiento de 20mm.

El dispositivo de ensayo va conectado a un computador, lo que permite de manera automática registrar y procesar la información en tiempo real. La curva obtenida al finalizar la prueba, muestra un comportamiento típico como el que se presenta en la Figura 3-11.

El ensayo bajo agua permite, además de caracterizar las mezclas asfálticas en relación a su resistencia a la deformación plástica acumulada bajo carga repetida (ahuellamiento), su caracterización según la susceptibilidad a la humedad. En el primer caso, la resistencia a la deformación plástica se cuantifica por la profundidad de la huella tras las reiteradas pasadas de la rueda, mientras que para la susceptibilidad a la humedad, el parámetro indicador es el punto donde ocurre el desprendimiento de la película de asfalto que recubre las partículas de árido (debido a la penetración del agua) o “Stripping Inflection Point (SIP)”. Este punto marca el inicio del ataque del agua en la mezcla asfáltica, que afecta directamente la adherencia entre el agregado y el asfalto.

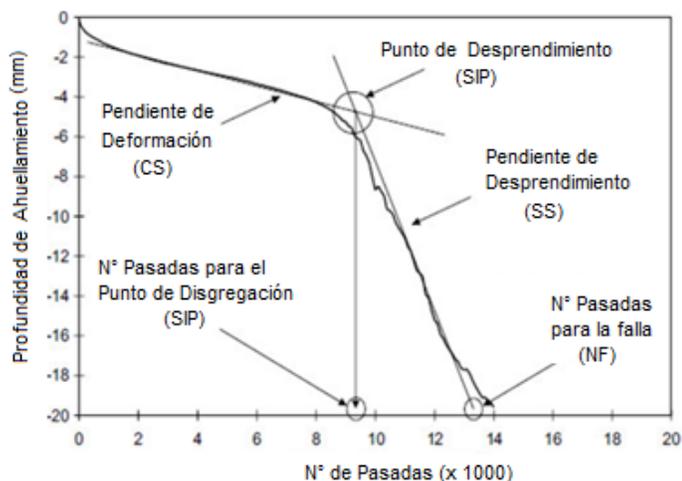


Figura 3-11. Profundidad de ahuellamiento versus número de pasadas de la rueda.

Se debe tener presente que para la caracterización de las mezclas asfálticas respecto a su resistencia a la deformación plástica acumulada, solo es relevante lo que ocurre antes del SIP. Las deformaciones producidas después de este punto, son producto principalmente del desprendimiento del árido sin aporte de ligante (disgregación de la mezcla).

Para caracterizar las mezclas asfálticas de acuerdo a la descripción del ensayo en la AASHTO T324-04, se deben determinar los siguientes parámetros del gráfico Profundidad de Ahuellamiento versus el número de pasadas de rueda (Figura 3-11):

- **SIP:** Punto de desprendimiento del asfalto o “Stripping Inflection Point”: El número de pasadas representativo del SIP, se determina a partir del segundo cambio de curvatura en la curva (punto de inflexión), y se calcula con la ecuación siguiente:

$$SIP = \frac{\text{Intercección al eje curva (SS)} - \text{Intercección al eje (CS)}}{\text{Pendiente CS} - \text{Pendiente SS}} [N^{\circ} \text{ pasadas}]$$

Ecuación 3-6

- **NF:** Número de pasadas de la rueda en la falla.
- Velocidades de deformación antes y después del punto de desprendimiento (mm/1000 pasadas de rueda), denominadas respectivamente:
 - Pendiente de deformación o Creep Slope (**CS**): pendiente luego de la consolidación dada por la deformación permanente de la mezcla asfáltica (ahuellamiento).
 - Pendiente de desprendimiento o Strip Slope (**SS**): pendiente típica de la deformación y desprendimiento del material granular sin ligante (ataque del agua).

- **Compactador Giratorio:** A diferencia del martillo Marshall, el compactador giratorio realiza la compactación de las probetas por amasado. Esto se consigue haciendo girar a 30rpm la base del molde, que se encuentra inclinada en un ángulo de 1.25° respecto a la vertical, mientras se ejerce una presión de 600kPa sobre la mezcla asfáltica. El compactador giratorio permite compactar probetas cilíndricas de diámetros de 100 y 150mm.

3.2. Trabajo en Terreno

3.2.1. Controles receptivos a la mezcla asfáltica

Se deben realizar los siguientes controles de calidad a la mezcla asfáltica preparada en Planta, para verificar que cumpla su función en el pavimento.

3.2.1.1. Densidad máxima de la mezcla (DMM)

El procedimiento para la determinación del DMM a partir de una muestra asfáltica, se encuentra descrito en 8.302.37 del M.C.-V.8. Su cálculo es determinante para calcular el porcentaje de vacíos de aire (8.302.47 del M.C.-V.8), tanto de una probeta preparada en Laboratorio, como de un testigo extraído del pavimento.

3.2.1.2. Contenido de asfalto

La proporción de asfalto en la mezcla, determinada de manera exacta en el laboratorio, es fundamental en el desempeño de esta, por lo que debe ser controlada con precisión en obra, a partir de muestras de mezcla asfáltica tomadas durante las faenas de colocación.

En este trabajo en particular, la determinación del contenido de asfalto se realiza mediante el Horno de Ignición según el método descrito en 8.302.56 del M.C.-V.8, el cual consiste en la separación del asfalto y el agregado mediante la aplicación de calor. En este procedimiento, las muestras de mezcla asfáltica son sometidas a temperaturas sobre los 400°C, a las cuales el asfalto se calcina mientras que el agregado permanece prácticamente intacto (no se degrada). Por diferencias de pesadas entre la masa inicial de la muestra de mezcla y la masa residual de agregado, es posible determinar el porcentaje de asfalto de la muestra ensayada. El porcentaje de ligante se expresa como porcentaje del árido (masa residual).

El peso y el cambio de masa se determinan automáticamente a través de un sistema de obtención de datos y un programa computacional que posee el Horno de

Ignición. El ensayo termina cuando al cabo de tres minutos consecutivos, la pérdida de masa no excede 0.01% del total de masa ensayada.



Figura 3-12. Muestras de mezcla asfáltica inicial y masa residual de agregado (método de ignición).

Dado que el resultado obtenido en el ensayo puede ser afectado por el tipo de agregado de la mezcla, el contenido de asfalto determinado tras la ignición debe ser calibrado, restándole un Factor de Corrección, el cual se establece para cada tipo de mezcla. El factor de corrección representa la pérdida por ignición de los componentes de una mezcla asfáltica sin considerar el asfalto quemado. En el caso de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho, este factor queda determinado por parte del agregado (finos principalmente) y el polvo de caucho que se calcinan, mientras que en el caso de las mezclas asfálticas tradicionales, solo por una pequeña fracción de agregado que se quema.

Existen dos maneras de determinar el factor de corrección (FC):

- El primer procedimiento consiste en quemar dos muestras de mezcla asfáltica preparadas en Laboratorio con un contenido conocido de asfalto (igual para ambas) y determinar las diferencias entre los valores de asfalto obtenidos de la ignición y el porcentaje conocido incorporado a la mezcla. Finalmente, la media aritmética de las dos diferencias absolutas definen el factor de corrección.
- El otro procedimiento, consiste en preparar una mezcla con los agregados, sin ligante asfáltico, de acuerdo con la dosificación de diseño y luego calcinarla. La diferencia de peso de la masa inicial y final, expresada en porcentaje referido al agregado, corresponde al factor de corrección. Dado que el polvo de caucho, interacciona con el ligante en el proceso de digestión (no se comporta como un árido), no es recomendable determinar el factor de corrección por esta forma (valor no sería representativo).

Para mezclas asfálticas convencionales, la evaluación del contenido de asfalto se efectúa según el procedimiento descrito en 5.408.304(3) del M.C.-V.5. Para carpetas de rodadura, se establece que una muestra individual es aceptable si su porcentaje de

asfalto (Pt) es mayor o igual a $P_b - 0.3\%$ o menor o igual a $P_b + 0.3\%$, siendo P_b el porcentaje de asfalto de la dosificación (establecido en 8.302.47 del M.C.-V.8).

3.2.1.3. Granulometría

El agregado que queda después de la ignición puede usarse para analizar su granulometría. La granulometría de los áridos obtenidos, debe ajustarse a la banda de trabajo, según lo señalado en 5.408.302(3) del M.C.-V.5, la cual se obtiene de la fórmula de trabajo definida en 8.302.47 del M.C.-V.8.

3.2.2. Controles receptivos a la unidad terminada

3.2.2.1. Compactación y espesor a partir de testigos

Los espesores y densidades de cada capa asfáltica se establecen a partir de testigos, muestras cilíndricas aserradas extraídas del pavimento. La extracción de testigos se realiza de acuerdo al método descrito en 8.502.3 del M.C.-V.8.

En general, a menos que el proyecto indique lo contrario, el procedimiento para la evaluación de la densidad y el espesor dentro de cada sector homogéneo (con el mismo espesor contratado y densidad de capa asfáltica) se señala en la Sección 5.408.304 del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras. En el caso de calzadas, la evaluación se realiza a los testigos extraídos por pista a razón de uno cada 1750m^2 o fracción de pavimento (equivalente a 500m, si la pista tiene un ancho de 3.5m), y por media fija, tomando grupos de cinco muestras consecutivas (si no es posible disponer de cinco valores se aceptan lotes de hasta mínimo dos muestras). Las bermas se evalúan aparte, extrayendo un testigo representativo cada 1750m^2 o fracción de pavimento, y la evaluación se hace por determinación individual.

3.2.2.1.1. Compactación de una capa asfáltica

La compactación de una capa asfáltica se evalúa a partir de la medición de la densidad realizada a los testigos, determinada con el Método 8.302.38 del M.C.-V.8. La compactación se expresa en porcentaje y se obtiene dividiendo la densidad de los testigos por la densidad de diseño Marshall, expresada en números enteros.

Para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada, el porcentaje de compactación de los testigos se evalúa según el procedimiento descrito en el acápite 5.408.304(1) del M.C.-V.5. En el caso de calzadas, la densidad de compactación no debe ser inferior al noventa y siete por ciento (97%) de la densidad

Marshall de referencia, ya sea la evaluación realizada por muestra individual o media fija. En el caso de bermas, la exigencia es de mínimo noventa y seis por ciento (96%) por muestra individual.

3.2.2.1.2. Espesor de una capa asfáltica

El espesor de los testigos extraídos se determina con el Método descrito en 8.302.41 del M.C-V.8. El espesor de cada muestra cilíndrica, corresponde al valor promedio de cuatro medidas equidistantes de su altura, realizadas con un pie de metro. Dado que la muestra está compuesta por más de una capa, la medición se realiza en el manto del cilindro. El espesor se expresa en mm y se redondea a números enteros.

El espesor medido a los testigos se evalúa según el procedimiento descrito en 5.408.304(2) del M.C-V.5. En el caso de calzadas, el espesor de una muestra individual y el representativo de un lote de cinco muestras consecutivas no deben ser inferiores al previsto en el diseño estructural del proyecto (espesor contratado).

3.2.2.2. Medición de deflexiones mediante el Deflectómetro de Impacto (FWD)

La deflexión de un pavimento representa la respuesta estructural ante la aplicación de una carga vertical externa en el rango elástico. Cuando se aplica una carga en la superficie no solo se desplaza el punto bajo su aplicación, sino que también lo hace la zona alrededor del punto, denominada cuenco de deflexión.

El Deflectómetro de Impacto o Falling Weight Deflectometer (FWD) es un equipo que aplica una carga de impacto vertical a la superficie del pavimento, generada por una masa en caída libre desde una altura predefinida, y determina los desplazamientos verticales absolutos producidos en ella (cuenco de deflexiones), mediante una serie de sensores ubicados a distancias específicas del punto de impacto, incluido el punto de aplicación de la carga.

Las deflexiones medidas, pueden ser correlacionadas con la capacidad estructural del pavimento, a través de un procedimiento denominado retroanálisis. Este es un método matemático iterativo donde se ajustan las deflexiones medidas con las deflexiones teóricas obtenidas a partir de un modelo de pavimento multicapas (con espesores conocidos y módulos elásticos por determinar), y que permite así, determinar la rigidez de la estructura del pavimento y la del suelo de fundación (capacidad de soporte), que definen la condición de la estructura. De manera general, si la deflexión es alta, la capacidad estructural del modelo de pavimento es débil o deficiente, y viceversa.

El procedimiento de ensaye para la medición de deflexiones mediante el FWD se encuentra descrito en 8.502.5 del M.C-V.8, mientras que el retroanálisis de deflexiones se describe en 8.502.6 del M.C-V.8.

El procedimiento de retroanálisis utilizado a nivel nacional corresponde al recomendado por la Guía de Diseño Estructural AASHTO 1993. Entre las características estructurales más relevantes determinadas se encuentran:

- **DMX** (a 50kN y 20°C): Deflexión máxima normalizada a una carga de 50kN y a una temperatura de 20°C medida en micrómetros (μm). Representa la deflexión vertical de la superficie del pavimento, bajo el punto donde se aplica la carga.
- **MR**: Módulo resiliente de la subrasante. Representa el módulo elástico del suelo de la subrasante luego de aplicar cargas cíclicas sobre él.
- **NEef** del pavimento: Número estructural efectivo, se obtiene del retroanálisis de los pavimentos asfálticos y considera tanto las capas asfálticas como las granulares.

El número estructural es un concepto introducido en la prueba AASHO (1958-1961) para caracterizar la capacidad estructural de los pavimentos asfálticos y es utilizado para el diseño de pavimentos de asfalto (método AASHTO-1993).

- En este trabajo en particular, la evaluación estructural de los pavimentos se lleva a cabo con el Deflectómetro de Impacto del Laboratorio Nacional de Vialidad, de la firma sueca KUAB. Este modelo permite simular cargas de tránsito reales de hasta 156kN, pero para los efectos de este estudio, se utilizaron cargas representativas de vehículos pesados de aproximadamente 50kN. El FWD funciona con siete sensores que miden las deflexiones generadas.



Figura 3-13. Deflectómetro de Impacto.

3.2.2.3. Regularidad superficial (IRI)

La rugosidad superficial son alteraciones geométricas del perfil longitudinal del camino que provoca vibraciones en los vehículos que lo recorren. Estas irregularidades

son la causa de los problemas de confort que el usuario detecta como movimiento vertical no deseado (es la característica más percibida por ellos), y pueden provenir de fallas constructivas o singularidades, entendiéndose como tal todas las variaciones del perfil de origen no constructivo, tales como puentes, tapas de alcantarillas, accesos y otras, que por diseño geométrico afectan el perfil.

La regularidad superficial se expresa mediante el indicador IRI, sigla que define el Índice de Rugosidad (Regularidad) Internacional (International Roughness Index), que corresponde al movimiento vertical acumulado, en valor absoluto, dividido por la distancia recorrida, bajo condiciones de velocidad controlada.

La mayoría de los equipos de medición miden el perfil directamente, para luego analizarlo y obtener el IRI del camino. Para esto utilizan un modelo matemático, conocido como Quarter Car, el cual determina los movimientos de un vehículo estandarizado circulando a una velocidad de 80km/hora.

Los equipos para medir el perfil, denominados Perfilómetros, deben ser clasificadas como Clase I según el Banco Mundial. Estos se caracterizan por su alta precisión, ya que son capaces de registrar la variación del perfil longitudinal a razón de no menos de cuatro puntos por metro, con una precisión de 0.5mm o mejor.

El método para la determinación de la rugosidad de los pavimentos mediante Perfilometría longitudinal, se encuentra descrito en 8.502.8 del M.C-V.8. A menos que el proyecto indique lo contrario, la evaluación del IRI se realiza según el procedimiento descrito en 5.408.304(5) del M.C-V.5:

- El IRI se procesa según el sentido del tránsito, en cada pista separadamente. El kilometro inicial debe ajustarse al primer múltiplo de 200m, según el balizado del camino. El IRI se informará en m/km, aproximando a un decimal.
- En general, se entiende que la superficie del pavimento tiene una rugosidad aceptable, si todos los promedios de cinco tramos consecutivos de 200m o fracción (medias fijas), tiene un valor de IRI igual o inferior a 2.0m/km y ninguno de los valores individuales supera 2.8m/km. Para la evaluación, las singularidades que se pudieran presentar afectan el tramo completo de 200 metros, el cual no se incluye en la evaluación de la media fija. Si el tramo tiene menos de 100m tampoco se considera en la evaluación. Si no es posible disponer de cinco valores consecutivos para formar la media fija y se cuente solo con cuatro, tres o dos valores, se considera como representativo, el valor medio de ellas.
- **Equipo de Medición:** En este trabajo en particular, las mediciones de IRI se realizan con Perfilómetros láser de alto rendimiento (Perfilómetro Laser ARAN y Perfilómetro Laser Multipropósito MLP). Estos equipos permiten obtener medidas instantáneas y de alta calidad del perfil del camino a velocidades estándar de

circulación (80-100km/h). Descriptivamente, los equipos cuentan con dos cámaras láser, cada una de las cuales se posiciona sobre cada una de las huellas de la pista a transitar. Cada cámara emite un rayo láser cuyo reflejo es registrado mediante un receptor permitiendo así evaluar la distancia del emisor láser al pavimento. Dado que esta distancia está afectada por el movimiento vertical propio de la amortiguación del vehículo, el equipo cuenta con acelerómetros que corrigen tal distorsión. Así la distancia corregida va construyendo el perfil relativo sobre la huella de la pista transitada.

- **Perfilómetro Laser ARAN (Automatic Road Analyzer):** Es un vehículo para la recopilación de datos sobre el estado del pavimento, que puede ser equipado con una combinación de hasta siete equipos con distintas funciones. El equipo principal es el Computador de Adquisición de Datos Central, que recolecta, organiza y almacena la información recogida por los otros subsistemas. Cuenta con un sistema láser para la medición de IRI, macrotextura y ahuellamiento. Los perfiles medidos son referidos linealmente usando un instrumento de medición de distancia a bordo (odómetro).
- **Perfilómetro Laser Multipropósito MLP:** Es un equipo integrado formado por tres sistemas de adquisición de datos; un Sistema Láser, un Sistema GPS y un Sistema de Video Digital, además de un Computador de Adquisición de Datos Central. El Sistema Láser, compuesto por trece cámaras, permite obtener además del IRI, indicadores como la macrotextura, ahuellamiento, escalonamiento y cotas relativas en un pavimento. El sistema se completa con un odómetro. La medición del IRI la realiza a intervalos de 50mm a una velocidad de operación que varía entre 15 y 95km/h.

3.2.2.4. Ahuellamiento

El ahuellamiento es un fenómeno que afecta a los pavimentos asfálticos que se manifiesta como una depresión longitudinal en la sección transversal (perpendicular al eje de la pista) y que de preferencia se localiza en las zonas del pavimento por donde circula la mayor parte del tránsito (huellas).

El método para determinar este parámetro se encuentra descrito en 8.502.11 del M.C.-V.8. El procedimiento de evaluación se debe efectuar cada 200m lineales, por cada huella y por pista. El ahuellamiento representativo del tramo, corresponde al mayor valor medido para las dos huellas (máxima depresión por huella). Las medidas se deben informar con la precisión al milímetro. No se debe medir ahuellamiento en singularidades que alteren localmente el perfil.

- **Equipo de Medición:** En este trabajo, las mediciones se realizan con el ARAN, a través de un perfilómetro laser montado sobre él. El perfilador utiliza dos cámaras

laser sincronizadas para medir el perfil transversal del pavimento, el cual es usado para calcular la profundidad de las deformaciones en ambas huellas. El ahuellamiento se obtiene a partir del modelamiento matemático de posicionar una regleta en cada huella. Este equipo de alto rendimiento permite determinar con exactitud el perfil en todo el ancho de la pista (trabaja en configuraciones de hasta 4.8m de ancho con una resolución lateral de 1.280 puntos). Su frecuencia de muestreo es de 20 hertzios (a 80km/h mide el perfil cada 1.1m).

3.2.2.5. Resistencia al deslizamiento del pavimento

3.2.2.5.1. Macrotextura mediante ensaye del círculo de arena

La medición de la macrotextura superficial del pavimento se efectúa con el ensaye de la mancha (o círculo) de arena según lo descrito en 8.602.25 del M.C.-V.8, dentro de un plazo de cuatro meses después de dado al tránsito.

El procedimiento consiste en extender sobre la superficie del pavimento un volumen conocido de arena fina normalizada. Se debe generar un círculo simétrico procurando llenar las cavidades de la superficie a ras con las crestas de los áridos de la capa de rodadura. De esta manera, a partir del volumen de arena utilizado (V) y del área cubierta por la misma (círculo de diámetro D), se calcula la profundidad media de los huecos rellenos por la arena, medida que representa la macrotextura superficial del pavimento (MTD):

$$MTD = \frac{4 * V}{\pi * D^2} [mm]$$

Ecuación 3-7

A nivel internacional, la clasificación de la macrotextura superficial sirve para estimar las velocidades seguras de circulación de los vehículos:

Tabla 3-8. Clasificación internacional de la macrotextura.

Tipo de Textura	MTD [mm]
Muy fina (No deben utilizarse)	< 0.2
Fina (Zonas urbanas de baja velocidad)	0.2 < MTD < 0.4
Media (Velocidades entre 80 y 120km/h)	0.4 < MTD < 0.8
Profunda (Velocidades mayores a 120km/h)	0.8 < MTD < 1.2
Muy Profunda (Velocidades mayores a 120km/h)	1.2 < MTD

A nivel nacional, la evaluación se realiza de acuerdo al procedimiento descrito en 5.408.303(3)a) del M.C.-V.5. Se requiere realizar cuatro mediciones por kilómetro y por pista (representativas de un tramo homogéneo 250m). Se exige un MTD mínimo de 0.6mm.

3.2.2.5.2. Macrotextura mediante perfilometría laser

La estimación de la macrotextura del pavimento se puede efectuar también usando métodos perfilométricos de alto rendimiento según el procedimiento descrito en 8.602.27 del M.C.-V.8. Este método cubre el cálculo de la profundidad media del perfil (MPD) a partir del uso de cámaras laser.

Para efectuar el control receptivo y de explotación, se debe procesar la información medida cada 200m. Los valores obtenidos corresponden al promedio obtenido en cada subtramo en milímetros, siendo este el valor representativo de la textura superficial correspondiente.

- **Equipo de Medición:** En este trabajo en particular, las mediciones se realizan con el Perfilómetro Laser ARAN. El equipo mediante láseres de alta frecuencia (de 64kHz), obtiene el perfil digital de macrotextura, a partir del cual calcula automáticamente la profundidad promedio en la superficie auscultada. El sistema puede adquirir la macrotextura a velocidades de hasta 100km/h.

3.2.2.5.3. Coeficiente de fricción transversal con SCRIM

El procedimiento para la medición del Coeficiente de Fricción Transversal en pavimentos se efectúa con un equipo de diseño británico denominado SCRIM (Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine), según lo indicado en 8.602.17 del Volumen N° 8 del Manual de Carreteras. El SCRIM es un equipo de ensaye no destructivo y de alto rendimiento que permite apreciar la adherencia de los pavimentos midiendo el Coeficiente de Fricción Transversal de modo continuo y en carretera mojada.

El SCRIM es un camión que suministra automáticamente una película de agua (de aproximadamente 0.5mm) sobre la superficie del pavimento para simular una condición de humedad controlada. Está dotado de una rueda normalizada en el lado derecho (cargada con una masa de 200kg y provista de un neumático liso), que efectúa la medición en la línea de rodadura. La rueda de medición desviada en un ángulo de 20° con respecto a la dirección de circulación, induce una fuerza lateral en su eje, que es proporcional al coeficiente de fricción del pavimento. La velocidad relativa la rueda oblicua de ensaye y el pavimento es equivalente a la velocidad del vehículo (50 ± 5 km/h) por el seno del ángulo de deriva (20°). Esto quiere decir que es un equipo que

mide la fricción a velocidades bajas, a pesar que la velocidad del vehículo sea alta. El SCRIM dispone de equipos especiales para la adquisición y procesamiento de la información. Los valores medidos a 50 ± 5 km/h se informan en unidades SFC (Sideway Friction Coefficient).

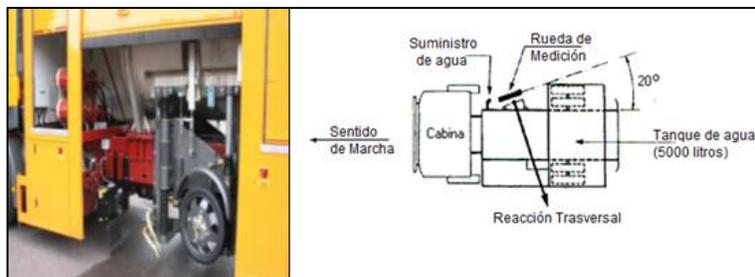


Figura 3-14. Equipo para la determinación de fuerzas transversales en SCRIM.

La evaluación del coeficiente de fricción con el SCRIM se realiza de acuerdo al procedimiento descrito en 5.408.303(3)b) del M.C.-V.5, dentro de un plazo de cuatro meses después de dado el tránsito. La medición se debe efectuar en forma continua y en cada una de las pistas, incluyendo singularidades. Los valores medidos deben ser informados cada 200m o fracción de término. La Tabla 3-9 presenta los valores mínimos exigidos y se debe cumplir en toda la longitud del camino.

Tabla 3-9. Exigencias para las medidas del coeficiente de fricción con SCRIM.

Coeficiente de Fricción	[SFC]
Tramos con singularidades	Mínimo 0.55
Tramos sin singularidades	Mínimo 0.40

Fuente 3:4: Tabla 5.408.303 B del M.C.-V.5.

3.2.2.5.4. Coeficiente de fricción con el péndulo británico TRRL

Se puede controlar también el coeficiente de fricción en condición húmeda con el péndulo británico TRRL (desarrollado por la Transport and Road Research Laboratory), cuyo procedimiento de ensayo y evaluación esta normado por el Manual de Carreteras en 8.502.16 del M.C.-V.8.

El péndulo mide las características antideslizantes de todo tipo de superficies en forma puntual. El ensayo consiste en medir la pérdida de energía del péndulo, de características estandarizadas y provisto en su extremo de una zapata de goma, al momento que la zapata roza la superficie a ensayar (húmeda).

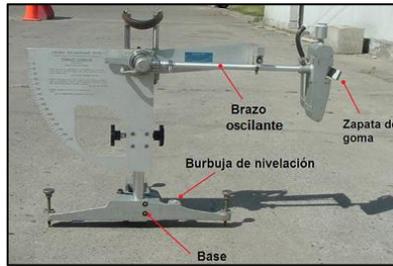


Figura 3-15. Péndulo TRRL.

El péndulo TRRL es un instrumento indicativo de la resistencia al deslizamiento a bajas velocidades (< 50km/h), y por consiguiente provee medidas para la microtextura (característica propia del árido expuesto). La medición entrega como resultado el valor BPN (British Pendulum Number), sin embargo, el resultado del ensayo se debe entregar en tanto por uno, en forma de CRD (calibrado por temperatura a 20°C):

$\text{Coef. de Resistencia al Deslizamiento (CRD)} = \text{Lectura efectiva de BPN} / 100$

Ecuación 3-8

La evaluación del coeficiente de fricción con el péndulo TRRL se realiza de acuerdo al procedimiento descrito en 5.408.303(3)b) del M.C-V.5. En proyectos urbanos se requiere realizar 20 mediciones por kilómetro y por pista, en otros tipos de proyectos son 10 mediciones por kilómetro y por pista, y en caso de tramos experimentales, estos se realizan según la necesidad del estudio. Estas se pueden efectuar en las rodaduras internas o externas. La Tabla 3-10 presenta los valores umbrales del coeficiente de fricción para efectos de controles receptivos.

Tabla 3-10. Exigencias para las medidas del coeficiente de fricción con el péndulo TRRL.

Coeficiente de Fricción (BPN)	
Tramos con singularidades	Mínimo 55
Tramos sin singularidades	Mínimo 65

Fuente 3:5: Tabla 5.408.303 C del M.C.-V.5.

CAPÍTULO 4 CONFECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE TRAMOS DE PRUEBA

En este Capítulo se aborda el desarrollo del presente trabajo de investigación y los correspondientes resultados obtenidos, según la metodología de ensayos descrita en el Capítulo 3. Este comprende dos secciones, en cada una de las cuales se presenta el procedimiento llevado a cabo, en uno de los dos Tramos de Prueba, a nivel de Laboratorio y de Terreno, cuya capa de rodadura se confecciona con una mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho reciclado de N.F.U. por vía seca.

Las mezclas asfálticas modificadas en los Tramos de Prueba (capa superficial), se fabrican a partir de la misma dosificación de la mezcla asfáltica utilizada en la capa de rodadura del Contrato al cual pertenecen, incorporándole polvo de caucho como un agregado. Estas corresponden a mezclas asfálticas convencionales (con cemento asfáltico tradicional), cuyo diseño está a cargo de la Empresa Contratista (o Subcontratistas).

Antes de comenzar, en la Figura 4-1, se señala la forma en que se identifican normalmente las pistas para los controles a realizar. En general, la faja derecha corresponde al kilometraje (Km) creciente según el balizado del camino y sus pistas se enumeran con números impares de manera incremental desde el eje central (1, 3, 5, etc.). De manera similar, la faja izquierda corresponde al kilometraje decreciente y las pistas pares; cuya numeración se incrementa desde el eje central (2, 4, 6, etc.).

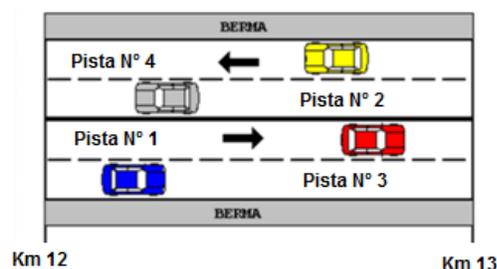


Figura 4-1. Identificación y numeración de pistas.

4.1. Tramo de Prueba I (Ruta G –184, Km 0.077- Km 0.502)

El primer Tramo de Prueba, de 425m de longitud, se extiende desde el Km 0.077 (acceso por la Ruta 68) al Km 0.502 en el Contrato **“Reposición Ruta G-184 Sector El Noviciado, Tramo Km 0.077 – Km 5.400, Comuna de Pudahuel, Provincia de Santiago, Región Metropolitana”**. La Ruta G-184 une de manera directa y rápida la

zona de Lampa, en la Provincia de Chacabuco, con la ciudad de Santiago, favoreciendo la conectividad de esa zona.

La Obra total tiene una longitud total de 5.323km, y se divide en tres sectores, de acuerdo al tipo de pavimento y su estructuración, como se muestra en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Tipos de pavimento en el Proyecto y estructuración.

Sector	Km	Km	Tipo de Pavimento	Espesor de capas asfálticas [cm]	
				Rodadura	Binder
1	0.077	2.600	CA	5	9.5
2	2.600	4.473	CA	5	5
3	4.473	5.400	TSD	-	-

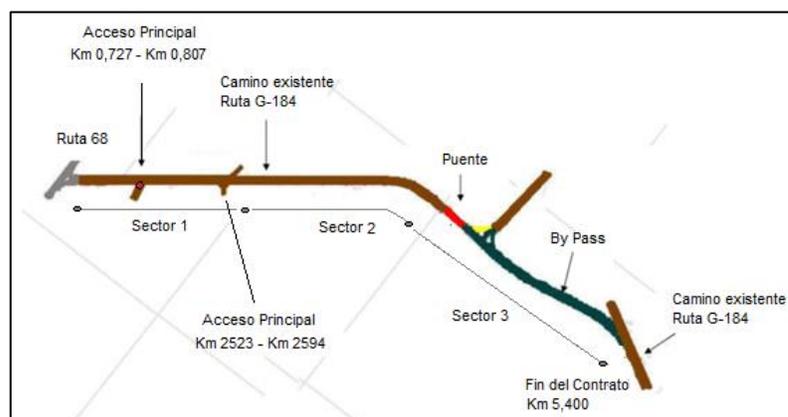


Figura 4-2. Planta general del Proyecto.

Los sectores 1 y 2, desde Km 0.077 hasta Km 4.473 (entrada al Puente El Noviciado), corresponden a un pavimento de tipo concreto asfáltico (CA) y el sector 3 (Km 4.473 al Km 5.400) corresponde a un tratamiento superficial doble (TSD). Respecto a la estructuración del pavimento de tipo CA, en los sectores 1 y 2, estos sólo presentan diferencias en el espesor de sus respectivas capas intermedias (binder).

El camino tiene una calzada de 7m con dos pistas bidireccionales, cuyos anchos de bermas y pistas se detalla en Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Ancho de pistas y bermas.

Faja	N° de Pista	Ancho de Pista	Ancho de Berma
Derecha	1	3.5m	1.5m
Izquierda	2	3.5m	2.5m

Dado que los pavimentos en estudio (Tramo de Prueba y tramo con mezcla asfáltica tradicional), se encuentran ubicados en el sector 1, se pondrá énfasis solo en ese sector de aquí en adelante.

- **Características principales del sector en estudio (Km 0.077 al Km 2.600):**

El pavimento de tipo concreto asfáltico corresponde a una carpeta asfáltica de 5cm de espesor dispuesta sobre un binder de mezcla asfáltica con asfalto tradicional de 9.5cm de espesor y una base granular de 28cm de espesor.

Tabla 4-3. Estructura del pavimento asfáltico colocado.

Capa	Espesor [cm]
Rodadura	5
Binder	9.5
Base granular (CBR \geq 80%)	28

Para la capa de rodadura, las mezclas asfálticas en caliente que se utilizan son:

- Desde el Km 0.077 al Km 0.502 (Tramo de Prueba), se ocupa una mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho por vía seca para tránsito pesado, de tipo semidensa, con banda granulométrica IV A 12 y tamaño máximo de árido 3/4" (20mm).
- Desde el Km 0.502 al Km 2.600 (continuación del Tramo de Prueba), se ocupa una mezcla asfáltica en caliente tradicional para tránsito pesado, de tipo semidensa, con banda granulométrica IV A 12 y tamaño máximo de árido 3/4".

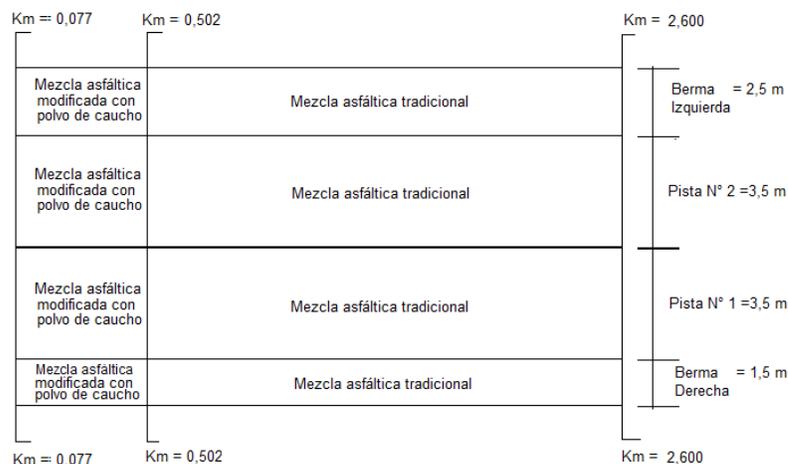


Figura 4-3. Concreto asfáltico para capa de rodadura (Km 0.077 al Km 2.600).

4.1.1. Mezcla asfáltica tradicional

4.1.1.1. Dosificación de diseño y Fórmula de trabajo

La dosificación de diseño y fórmula de trabajo presentadas por el Contratista, para la mezcla asfáltica tradicional (Km 0.502 al Km 2.600), se resumen a continuación. Esta se debe reproducir en Laboratorio, para verificar el cumplimiento de las especificaciones respectivas (controles de calidad), y fijar la pauta de evaluación una vez que sea fabricada en Planta.

En la mezcla asfáltica en cuestión, se emplean tres tipos de áridos: Gravilla 3/4", Polvo Roca 3/8" y Polvo Roca 5mm, cuyas proporciones en peso son las siguientes:

Tabla 4-4. Dosificación de áridos.

Tipo de material	Gravilla 3/4"	Polvo Roca 3/8"	Polvo Roca 5mm
Dosificación en peso	30%	60%	10%

La granulometría de diseño de los agregados y la banda de trabajo según el Contratista se muestran en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5. Granulometría de diseño y banda de trabajo del Contratista.

Tamiz		Gravilla 3/4"	Polvo Roca 3/8"	Polvo Roca 5mm	Mezcla	Banda de Trabajo	
ASTM	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	
3/4"	20	100	100	100	100	100	100
1/2"	12.5	47	100	100	84	79	89
3/8"	10	16	100	100	75	70	80
N° 4	5	4	66	100	51	46	56
N° 8	2.5	4	44	74	35	31	39
N° 16	1.25	1.9	31	47	24	20	28
N° 30	0.63		22	30	16	13	19
N° 50	0.315		16	21	12	9	15
N° 100	0.16		12	16	8.8	6.8	10.8
N° 200	0.08		8.1	13.0	6.2	4.7	7.7

La fórmula de trabajo para la confección de la mezcla asfáltica tradicional, se muestra en la Tabla 4-6. La dosificación del asfalto se expresa en porcentaje respecto al peso del agregado (% r.a.).

Tabla 4-6. Fórmula de trabajo del Contratista.

Contenido Óptimo de Asfalto	% r.a.	5.1 ± 0.3
Temperatura de Mezclado	°C	160
Temperatura de Compactación	°C	145
Densidad Marshall	kg/m3	2362

4.1.1.2. Caracterización y Control de calidad de materiales componentes

A continuación, se procede a caracterizar los materiales constituyentes en Laboratorio. Las propiedades medidas deben cumplir los requisitos exigidos en el Manual de Carreteras (5.408.2 del M.C.-V.5).

4.1.1.2.1. Agregados pétreos

A los áridos se les realizan los siguientes ensayos para su caracterización y control:

- Granulometría de los áridos y la mezcla de áridos (Tabla 4-7)

Se determina la granulometría de cada uno de los áridos componentes y la granulometría compuesta, según la dosificación presentada por el Contratista (Tabla 4-4). La mezcla debe analizarse según la banda granulométrica especificada en el Proyecto, correspondiente a la Semidensa IV-A-12 (Tabla 5.408.201.F del M.C-V.5).

Se verifica la granulometría de áridos requerida para el Proyecto (Figura 4-4).

Tabla 4-7. Granulometría de áridos y banda especificada en el Proyecto.

Tamiz		Gravilla 3/4"	Polvo Roca 3/8"	Polvo Roca 5mm	Mezcla Laboratorio	Mezcla IV-A-12	
		30%	60%	10%		% Pasa	
ASTM	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa		
3/4"	20	100			100	100	0
1/2"	12.5	56			87	80	95
3/8"	10	17	100		75	70	85
N° 4	5	2	71	100	53	43	58
N° 8	2.5	1	47	72	36	28	42
N° 16	1.25		28	46	22	-	-
N° 30	0.63		18	30	14	13	24
N° 50	0.315		12	22	9	8	17
N° 100	0.16		9	16	7	6	12
N° 200	0.08		6	13	5	4	8

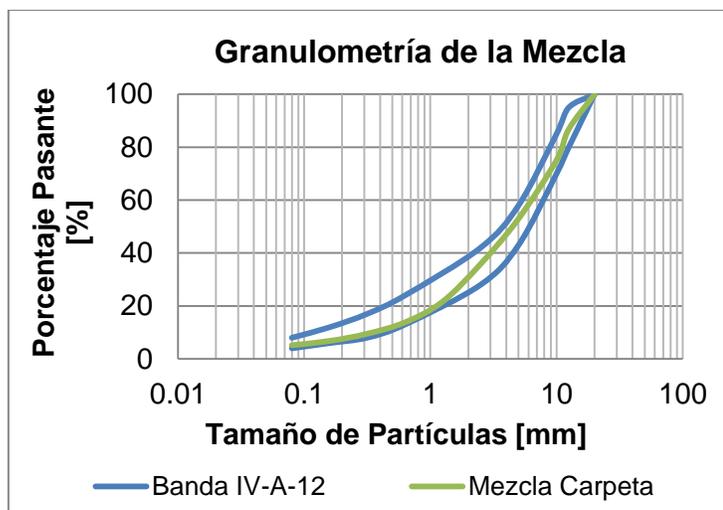


Figura 4-4. Granulometría de la mezcla de áridos y banda especificada en el Proyecto.

- Determinación de densidad real seca, densidad neta y absorción de los áridos (Tabla 4-8).

Tabla 4-8. Densidad y absorción de áridos.

Ensayo	Unidad	Gravilla 3/4"	Polvo Roca 3/8"	Polvo Roca 5 mm
Densidad Real Seca	kg/m ³	2657	2630	2700
Densidad Neta	kg/m ³	2776	2797	2837
Absorción	%	1.6	2.6	2.1

- Cubicidad de partículas y determinación de la resistencia al desgaste de Los Ángeles (Tabla 4-9).

Tabla 4-9. Forma y desgaste de la mezcla de áridos.

Ensayo	Unidad	Laboratorio	Control Calidad
Partículas Chancadas	%	99	Mín. 90
Partículas Lajeadas	%	1	Máx. 10
Desgaste de Los Ángeles	%	13	Máx. 25

Se verifica el cumplimiento de las especificaciones relativas a la forma y desgaste del árido.

4.1.1.2.2. Cemento asfáltico

En la Tabla 4-10 y la Tabla 4-11, se presentan los resultados de los ensayos de caracterización y los correspondientes controles de calidad realizados tanto al cemento asfáltico en su condición original como después de su envejecimiento primario, simulado en el horno de película delgada rotatoria (PDR). El cemento asfáltico tradicional utilizado corresponde a uno del tipo CA-24.

Se incluyen además la caracterización del asfalto después del envejecimiento secundario, simulado en la cámara de envejecimiento a presión (PAV).

Tabla 4-10. Cemento asfáltico original (CA-24).

Material Original: CA-24			
Ensayo	Unidad	Resultado	Control Calidad
Penetración, 25°C, 100g, 5s	0.1mm	43	Mín. 40
Viscosidad 60°C	Poise	3070	≥ 2400
Punto de Ablandamiento	°C	53.5	Informar
Ductilidad a 25°C, 5cm/min	cm	107.4	Mín. 100
Ensayo de la Mancha	% Xilol	< 10	Máx. 25%
Viscosidad Cinemática a 135°C	Poise	4.7	Informar
Índice de Penetración (Pfeiffer)		-0.9	-1.5 a +1.0
Índice de Fraass	°C	-6.0	Informar

Tabla 4-11. Cemento asfáltico después del Horno PDR.

Película Delgada Rotatoria			
Ensaye	Unidad	Resultado	Control Calidad
Pérdida por Calentamiento	%	0.4	Máx. 0.8
Penetración, 25°C, 100g, 5s	0.1mm	30	-
Viscosidad a 60°C	Poise	7810	Informar
Punto de Ablandamiento	°C	59.0	-
Ductilidad a 25°C, 5cm/min	cm	> 150	Mín. 100
Índice de Durabilidad	-	2.5	Máx. 3.5
Ensaye de la Mancha	% Xilol	< 15	-

Tabla 4-12. Cemento asfáltico después del PAV.

PAV		
Ensaye	Unidad	Resultado
Penetración, 25°C, 100g, 5s	0.1mm	20
Ductilidad a 12°C, 5 cm/min	cm	11
Viscosidad a 60°C	Poise	47100
Punto de Ablandamiento	°C	66.0
Ensaye de la Mancha	% Xilol	< 25

Se verifica el cumplimiento de las especificaciones relativas al cemento asfáltico.

4.1.1.2.3. Visación de la mezcla asfáltica tradicional

Con la fórmula de trabajo presentada por el Contratista, se reproduce la mezcla asfáltica en Laboratorio con el fin de corroborar la dosificación de diseño propuesta. De esta manera, con el contenido de asfalto óptimo, la granulometría de diseño y las temperaturas de mezclado y compactación informadas, se confeccionan tres probetas tipo Marshall, compactadas con 75 golpes por cara, según el Método 8.302.40 del M.C.-V.8. A partir de las probetas, se caracteriza la mezcla asfáltica según las propiedades Marshall (Método 8.302.47 del M.C.- V.8).

En la Tabla 4-13, se presentan los valores obtenidos (promedios de las tres probetas ensayadas), las cuales deben cumplir las especificaciones de la Tabla 5.408.203.A y B del M.C.-V.5.

Dado que se verifica el control de calidad, la mezcla asfáltica convencional puede ser utilizada para la confección de la mezcla asfáltica modificada del Tramo de Prueba, incorporándole polvo de caucho por vía seca.

Tabla 4-13. Análisis Marshall y control de calidad, mezcla asfáltica tradicional.

Análisis Marshall	Unidad	Visación	Control Calidad
Densidad Real Seca	kg/m³	2645	
Contenido Óptimo de Asfalto	%	5.1	
Densidad del Asfalto	kg/m³	1010	
Densidad Máxima de la Mezcla	kg/m³	2486	
Densidad Marshall	kg/m³	2344	Densidad de diseño $\pm 20\text{kg/m}^3$
Estabilidad	N	12031	> 9000
Fluidez	0.25mm	16	8 - 16
Huecos en la Mezcla, Va	%	5.7	4 - 6
Vacíos en el Agregado Mineral, VAM	%	15.7	> 14

4.1.2. Diseño de la mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho por vía seca

Para el diseño de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho (dosificación y determinación de condiciones de digestión), los métodos tradicionales, como el Método Marshall (8.302.47 del M.C.-V.8), no bastan. Para tal efecto, se requiere la realización de ensayos adicionales.

En este trabajo en particular, se ha tomado la metodología y normativa española actualmente vigente para llevar a cabo la confección de la mezcla asfáltica modificada a utilizar en el Tramo de Prueba. Adicionalmente, se ha usado como guía una propuesta de especificación técnica relativa al diseño de estas mezclas modificadas, realizada por un alumno de pregrado en el Laboratorio Nacional de Vialidad el año 2011 (Urrutia, 2011⁵), cuyos resultados se basan en la normativa española vigente hasta el año 2008 y en estudios anteriores realizados en el LNV.

En España se han construido desde el año 1996 más de 300km de mezcla asfáltica con polvo de caucho por vía seca en capa de rodadura y binder, y desde el año 2007 se han formulado documentos tanto normativos (Orden Circular 21/2007 de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento) como informativos (Manual

5 URRUTIA, Ricardo. 2011. Evaluación cuantitativa del comportamiento mecánico de Mezclas asfálticas modificadas incorporando polvo de caucho de N.F.U. nacional mediante vía seca. Universidad Andrés Bello.

de Empleo de caucho en mezclas bituminosas CEDEX-MMA-MFOM⁶), con requisitos y especificaciones técnicas tentativas para ligantes y mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho.

4.1.2.1. Polvo de caucho

El polvo de caucho disponible para incorporar en la mezcla asfáltica proviene de una Empresa nacional de reciclaje de neumáticos en desuso. La granulometría obtenida en Laboratorio se muestra en la Tabla 4-14 y, como se observa en la Figura 4-5, cumple la banda granulométrica especificada P-2 (NCh 3258-2012).

Tabla 4-14. Granulometría del polvo de caucho y banda especificada P-2.

Tamiz		Polvo de Caucho	Banda P - 2	
ASTM	mm	% que pasa	% que pasa	
N° 16	1.25	100	100	100
N° 30	0.63	67	40	100
N° 50	0.315	26	10	70
N° 100	0.160	7	2	40
N° 200	0.080	1	0	20

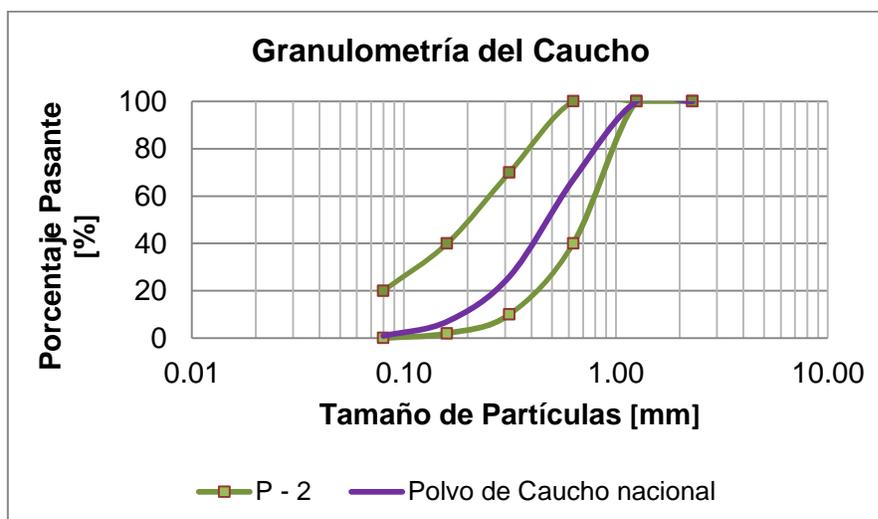


Figura 4-5. Granulometría del polvo de caucho y banda especificada P-2.

⁶ CEDEX (Centro de estudios y experimentación de obras públicas). 2007. Manual de Empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. Madrid, España.

4.1.2.2. Determinación de las condiciones de digestión

En el caso de la confección de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho por vía seca, es fundamental determinar el tiempo y la temperatura de digestión antes de proceder a su compactación.

Para determinar las condiciones de digestión en que se debe realizar la mezcla, la especificación técnica propuesta para su diseño (Urrutia, 2011), señala realizar el ensayo de Inmersión-Compresión, descrito en las normas españolas NLT-161 y NLT-162, y exigir una Resistencia Conservada mínima de 75%, de acuerdo a los estándares españoles presentes en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), publicados en la Orden FOM/891/2004. Para el ensayo, se deben confeccionar como mínimo seis probetas cilíndricas de diámetro y altura iguales a 101.6mm, con la dosificación de diseño y las condiciones de digestión a evaluar (tiempo y temperatura). Las probetas se deben dividir en dos grupos de tres, de manera que un grupo se acondiciona en agua y el otro en seco. La resistencia conservada finalmente se calcula como la razón entre la resistencia a compresión simple obtenida del promedio de las tres probetas acondicionadas en húmedo y el promedio de las tres probetas acondicionadas en seco.

De esta manera, en base a este procedimiento, se procede a fabricar probetas a temperaturas y tiempos crecientes, seleccionando aquellas condiciones que permitan obtener la Resistencia Conservada mínima exigida. Dado que el proceso de digestión también es función de las dosis de polvo de caucho y cemento asfáltico en la mezcla, se fijan estas variables antes de la realización de los ensayos.

Para el diseño de la mezcla asfáltica modificada, se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones respecto a las variables a definir:

- Contenido de polvo de caucho:

En la especificación técnica propuesta (Urrutia, 2011), se limita el contenido de polvo de caucho para las granulometrías de trabajo (P-1, P-2 o P-3 según NCh 3258-2012), a un porcentaje entre 0.5% y 1.0% referido al peso del agregado. Esto, según lo que se señala, asegura la efectividad del proceso de digestión (modificación de la reología y el aumento de la viscosidad del ligante), y, en consecuencia, proporciona mezclas asfálticas con mejores propiedades mecánicas con respecto a las que no incorporan este material (convencionales). Estas dosis también las avalan las experiencias españolas⁷.

⁷ GALLEGO, J. 2008. Tecnologías de mezclas bituminosas con caucho de neumáticos. Experiencia y normativa española. Madrid, España.

- Contenido de cemento asfáltico (tradicional):

En la dosificación de estas mezclas asfálticas modificadas, interesa utilizar dotaciones de ligante superiores a las habituales (mezclas asfálticas tradicionales) para así aumentar su durabilidad (sin exudaciones). Además, el polvo de caucho incorporado posee gran área superficial, por lo que se requiere generalmente mayores contenidos de asfalto.

- Tiempo de digestión:

En base a los resultados de las investigaciones nacionales (Ramírez, 2006⁸; Segovia, 2007 y Urrutia, 2011), los tiempos de digestión mínimos requeridos suelen ser de una hora o más, siendo habituales periodos prolongados de dos horas. De igual forma, la experiencia española avala tiempos de digestión del mismo orden. Es importante recalcar, que el tiempo estimado en Laboratorio debe cumplirse en terreno.

- Temperatura de digestión:

Dado el aumento en la viscosidad del ligante, producto de la incorporación del polvo de caucho, es necesario aumentar las temperaturas de confección de estas mezclas asfálticas modificadas (temperatura de digestión) para asegurar su modificación. Durante los procesos de mezclado y compactación en terreno, su mayor viscosidad dificulta su trabajabilidad a temperaturas donde las mezclas asfálticas convencionales aún son manejables, por lo que si en estas últimas la compactación se debe iniciar a los 140°C (5.408.303(2) del M.C.-V.8), en las mezclas modificadas, se debe iniciar como mínimo a una temperatura diez grados mayor que la señalada.

En la confección de las probetas para el ensayo de Inmersión-Compresión, se consideran los resultados de las investigaciones nacionales realizadas con granulometrías similares (Urrutia, 2011, Segovia, 2007), por lo cual se opta por incorporar en todos los ensayos a realizar un contenido de polvo de caucho de 0.5% referido al peso del agregado. Respecto al contenido de asfalto, dado que es el componente de más elevado costo, se decide iniciar las pruebas con la misma dotación utilizada en la mezcla asfáltica convencional visada (5.1% r.a.). Su dotación se irá subiendo progresivamente si la mezcla asfáltica modificada así lo requiere.

⁸RAMÍREZ, Náyade. 2006. Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. Universidad de Chile.
SEGOVIA, Raúl. 2007. Estudio del efecto de la variación en la granulometría del caucho en mezclas asfálticas por vía seca. Universidad de Chile.

Se realizan dos series de seis probetas cilíndricas, cada una con la dosis señalada (0.5% de polvo de caucho y 5.1% de asfalto, ambos porcentajes referidos al peso del agregado). Estas se someten a un proceso de digestión a temperatura fija de 170°C y a tiempos de 1½ y 2 horas, respectivamente. Los valores de resistencia conservada (IRC), para ambos tiempos de digestión, se muestran en la Tabla 4-15.

Tabla 4-15. Resistencia Conservada por ensayo de inmersión-compresión.

Contenido de Asfalto	Contenido de Caucho	Digestión		Tensión de Rotura [MPa]		IRC [%]
		Temperatura	Tiempo	Probetas en Seco	Probetas Sumergidas	
5.1%	0.5%	170°C	1 ½ hrs.	4.26	2.38	56
			2 hrs.	3.93	2.58	66

Debido a la complejidad técnica para realizar el ensayo de Inmersión-Compresión, se decide cambiar la metodología a la actualmente vigente en España; el ensayo de Sensibilidad al agua (denominado también ensayo de Tracción indirecta tras inmersión), cuyo procedimiento se encuentra descrito en las normas europeas UNE-EN 12969-12 y UNE-EN 12969-23.

Para la determinación de la Resistencia Conservada mediante este ensayo, se deben confeccionar como mínimo seis probetas cilíndricas con la dosificación de diseño y las condiciones de digestión a evaluar (tiempo y temperatura). Las probetas se deben dividir en dos grupos de tres, de manera que un grupo se acondiciona en agua y el otro en seco. Con respecto al resultado de este ensayo, las especificaciones españolas actuales exigen un Índice de Resistencia Conservada por tracción indirecta tras inmersión (ITSR), calculada como la razón entre la resistencia a tracción indirecta obtenida en húmedo y la resistencia a tracción indirecta en seco, de 85% como mínimo para capas de rodadura, de acuerdo a la Orden Circular 24/2008: PG-3, Artículo 542. Se estipula además, que el ensayo se debe realizar a 15°C y con probetas tipo Marshall compactadas por impacto con 50 golpes por cara.

- **NOTA:** A modo de información, se hace notar que a partir del año 2008 se adoptaron normas comunes de ensayo para toda la Comunidad Económica Europea. De esta manera, a partir de esa fecha, se derogaron las normas españolas NLT-161 y NLT-162, relativas al ensayo de inmersión-compresión. Es importante recalcar, sin embargo, que ambas prescripciones, dadas por los mínimos exigidos para la resistencia conservada, son equivalentes. En efecto, para la adaptación a la nueva metodología europea de ensayo, se tuvo que realizar una serie de estudios para obtener el nuevo parámetro de especificación para la resistencia conservada por tracción indirecta. Estos estudios determinaron a través de correlaciones, que el valor mínimo de 75% de resistencia conservada, obtenido a partir del ensayo de inmersión-compresión, equivalen aproximadamente a un 80%

de la obtenida en el ensayo a tracción indirecta⁹. Finalmente, a modo de asegurar la mayor representatividad de las muestras analizadas, se definió como exigencia el mínimo de 85% para esta resistencia conservada. De esta manera, la elección de la metodología de ensayo para medir la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la acción del agua (por ensayo de inmersión-compresión o tracción indirecta tras inmersión), sólo debe estar condicionada por la disponibilidad de los equipos de Laboratorio necesarios (prensa, moldes, etc.) y el personal calificado. Este nuevo método, no presenta mayores complejidades, de manera que personal técnico (Laboratoristas) puede realizarlo sin adiestramiento adicional, además es accesible a cualquier Laboratorio que trabaje con mezclas asfálticas, ya que todos cuentan con el equipamiento Marshall necesario para su realización. Solo se requiere adquirir adicionalmente, el dispositivo para el ensayo de tracción indirecta (prensa Lottman).

De esta manera, con el nuevo procedimiento de ensayo, se procede la confección de las mezclas asfálticas modificadas a evaluar. Para tal efecto, se realizan cuatro series de seis probetas Marshall (compactadas con 50 golpes) con la misma dosificación que se usó para el ensayo de Inmersión-Compresión, es decir, 5.1% de asfalto y 0.5% de caucho, ambos porcentajes referidos al peso del agregado. Cada grupo se somete a distintas condiciones de digestión, las cuales se definen a continuación:

- Digestión a 165°C de temperatura durante 1 ½ horas.
- Digestión a 165°C de temperatura durante 2 horas.
- Digestión a 170°C de temperatura durante 1 ½ horas.
- Digestión a 170°C de temperatura durante 2 horas.

En la Tabla 4-16, se muestran los resultados de las Resistencia a tracción indirecta (ITS) obtenidas para las probetas acondicionadas en condiciones en seco y en húmedo, y la Resistencia Conservada correspondiente (ITSR).

Tabla 4-16. Variación de la Resistencia Conservada por tracción indirecta con el tiempo y la temperatura de digestión.

Contenido de Asfalto	Contenido de Caucho	Digestión		ITS [MPa]		ITSR [%]
		Temperatura	Tiempo	Probetas en Seco	Probetas Sumergidas	
5.1%	0.5%	165°C	1 1/2 hrs.	2.04	1.60	78
			2 hrs.	2.03	1.61	79
		170°C	1 1/2 hrs.	1.96	1.54	78
			2 hrs.	1.99	1.61	81

⁹ RUBIO, Baltasar "et al". 2008. El ensayo europeo de sensibilidad al agua y su relación con los ensayos normalizados en España. España.

Como se observa en la Tabla 4-16, ninguna de las mezclas asfálticas modificadas logra alcanzar el índice de Resistencia Conservada mínimo de 85% (la pérdida de cohesión por acción del agua es superior al máximo exigido de 15%). Esto puede deberse a que el contenido de asfalto no es el óptimo para la granulometría y dosis de polvo de caucho escogidas, lo que afecta directamente la cohesión y el proceso de digestión y en consecuencia, los valores de resistencia conservada son bajos. De hecho, la falta de asfalto es notoria, la mezcla se vuelve muy viscosa, y poco trabajable.

A continuación se procede a realizar el ensayo con un mayor contenido de asfalto, para esto se confecciona una serie de seis probetas con una dotación de asfalto de 5.3% respecto al peso del agregado. El grupo se somete a un proceso de digestión a una temperatura de 170°C y un tiempo de 2 horas.

En la Tabla 4-17, se detallan los resultados del ensayo; tanto las Resistencia a tracción indirecta (ITS) obtenidas de las probetas secas y húmedas, como la resistencia conservada correspondiente (ITSR).

Tabla 4-17. Resistencia Conservada por tracción indirecta.

Contenido de Asfalto	Contenido de Caucho	Digestión		ITS [MPa]		ITSR [%]
		Temperatura	Tiempo	Probetas en Seco	Probetas Sumergidas	
5.3%	0.5%	170°C	2 hrs.	2.01	1.82	91

Con un contenido de 5.3% de asfalto, se obtiene un 91% de Resistencia Conservada por tracción indirecta tras inmersión, lo que supera el porcentaje mínimo requerido de 85%.

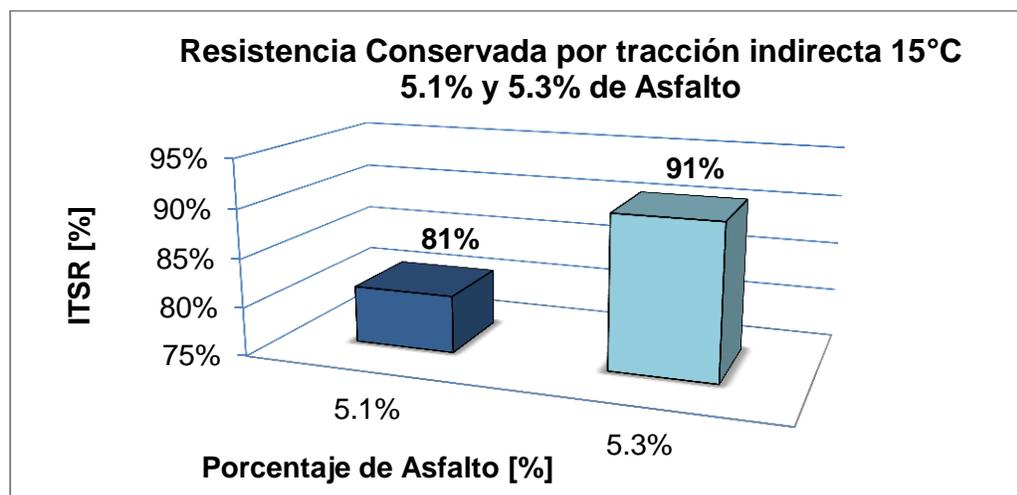


Figura 4-6. Variación de la Resistencia Conservada por tracción indirecta con el contenido de asfalto.

De la Figura 4-7, se puede observar que el valor de la resistencia conservada, depende casi exclusivamente del valor de resistencia a tracción indirecta de las probetas húmedas, que se incrementa a mayor contenido de asfalto (la resistencia a tracción indirecta de las probetas secas se mantienen casi constante).

Finalmente, para la dosificación de 0.5% de polvo de caucho (granulometría P-2) y de 5.3% de asfalto, ambos porcentajes referidos al peso del agregado, se determina que las condiciones de digestión deben ser las siguientes:

- Temperatura de digestión de 170°C.
- Tiempo de digestión de 2 horas.

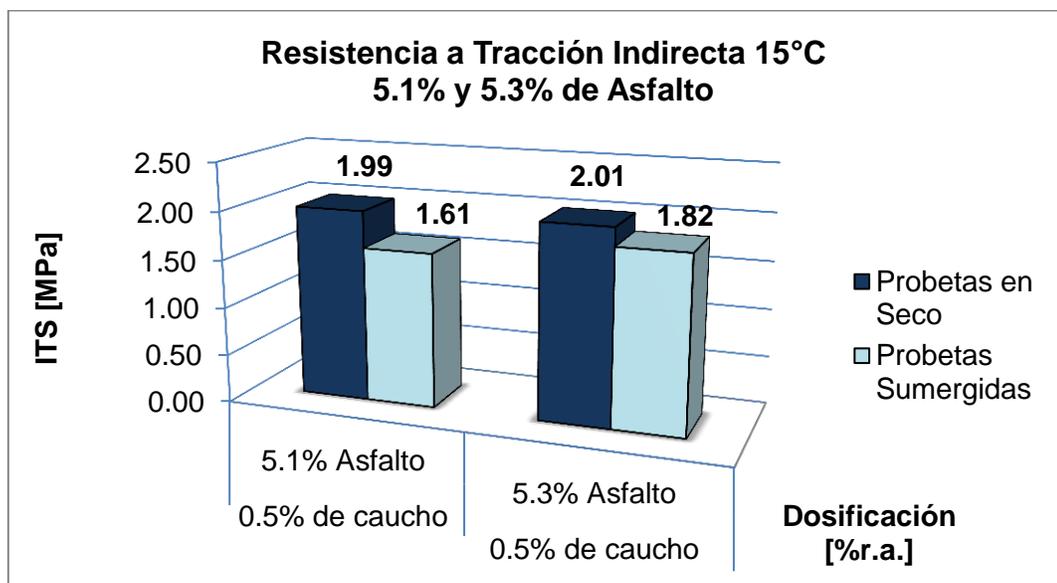


Figura 4-7. Variación de la resistencia a tracción indirecta con el contenido de asfalto.

4.1.2.3. Análisis Marshall

La especificación técnica propuesta para el diseño de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho (Urrutia, 2011), exige verificar el cumplimiento de las especificaciones relativas al ensayo Marshall para capa de rodadura (Tablas 5.408.203.A y 5.408.203.B del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras).

Se debe notar que a pesar que los requerimientos que se establecen en el Manual de Carreteras son válidos exclusivamente para mezclas asfálticas convencionales (sin incorporación de caucho), estos límites son de índole general, cuyo fin es asegurar que la dosificación establecida en el diseño proporcione a la mezcla las

propiedades de estabilidad, durabilidad, impermeabilidad trabajabilidad, flexibilidad, entre otras, limitando el contenido de huecos y las deformaciones plásticas bajo carga.

De esta manera, con el fin de estudiar la aplicabilidad de estas exigencias en las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho por vía seca, se verifican los parámetros Marshall obtenidos según el método 8.302.47 del Volumen N° 8 del Manual de Carreteras.

Las mezclas a compactar se dosifican con 5.3% de asfalto y 0.5% de polvo de caucho, ambos porcentajes referidos al peso del agregado, y se someten al tiempo y temperatura de digestión determinados en el ensayo de Sensibilidad al agua (digestión de 2 horas a 170°C). Una vez cumplido el tiempo de digestión, se procede a compactar tres probetas Marshall con 75 golpes por cara según Método 8.302.40 del M.C-V.8. Los resultados obtenidos del análisis Marshall se encuentran en la Tabla 4-18.

Tabla 4-18. Análisis Marshall y control de calidad, mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho.

Parámetros Marshall			Control Calidad
Densidad Real Seca	kg/m ³	2645	
Contenido de Asfalto	%	5.3	
Densidad Marshall	kg/m ³	2313	
Densidad Máxima de la Mezcla	kg/m ³	2464	
Estabilidad	N	14362	> 9000
Fluidez	0.25mm	12	8 - 16
Huecos en la Mezcla, Va	%	6	4 - 6
Vacíos en el Agregado Mineral, VAM	%	17	> 14

Se observa que los parámetros evaluados cumplen los requerimientos para las mezclas asfálticas convencionales.

4.1.2.4. Fórmula de trabajo

Finalmente, la fórmula de trabajo (visada) para la fabricación de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho para la carpeta de rodadura en el Tramo de Prueba es la siguiente (se impone la misma tolerancia para la dotación de asfalto de $\pm 0.3\%$ (porcentaje referido al peso del agregado), exigida para las mezclas asfálticas convencionales en 8.302.47 del M.C.-V. 8):

Tabla 4-19. Fórmula de trabajo para la fabricación de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho.

Contenido de Asfalto	% r.a.	5.3 ± 0.3
Contenido de Polvo de Caucho	% r.a.	0.5
Temperatura de Digestión	°C	170
Tiempo de Digestión	horas	2
Temperatura de Compactación	°C	160
Densidad Marshall	kg/m3	2313
ITSR	%	91

4.1.2.5. Verificación del diseño

A partir del diseño final, la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho se caracteriza a nivel de Laboratorio, según las siguientes propiedades mecánicas:

- Resistencia a la compresión diametral (NLT-346).
- Módulo resiliente a 15° y 25°C (UNE-EN 12697-26).
- Ahuellamiento y susceptibilidad a la humedad (AASHTO 324-04).

Los resultados a obtener representan una guía del comportamiento de esta mezcla asfáltica en el pavimento y sirven como datos para estimar sus resistencias estructurales una vez colocada en el Tramo de Prueba.

Adicionalmente, con el objetivo de validar su diseño, asegurando que la adición de polvo de caucho (bajo condiciones de digestión suficientes) produzca mezclas asfálticas con mejores propiedades mecánicas que las convencionales, se compara su comportamiento mecánico con el de una mezcla asfáltica tradicional, realizándole a esta última los mismos ensayos anteriormente señalados.

Dado que solo se pretende estudiar el efecto del polvo de caucho en las propiedades analizadas (modificación de la mezcla), ambas mezclas asfálticas se dosifican con el mismo contenido de ligante, de 5.3% respecto al peso del agregado (dosis correspondiente a la utilizada en el Tramo de Prueba), que en el caso de la mezcla asfáltica sin incorporación de polvo de caucho, no corresponde a su óptimo (de 5.1% respecto al peso del agregado).

En la Tabla 4-20, se presentan las condiciones de digestión o mezclado, según corresponda, de las mezclas con y sin incorporación de polvo de caucho, denominadas respectivamente “Caucho-1 (2hrs.)” y “Sin Caucho-1”.

Tabla 4-20. Condiciones de mezclado/digestión y compactación de mezclas con y sin polvo de caucho.

Denominación mezclas asfálticas		Sin Caucho-1	Caucho-1 (2hrs.)
Contenido de Asfalto	% r.a.	5.3	
Contenido de Polvo de Caucho	% r.a.	0	0.5
Tiempo Digestión	hrs.	-	2
Temperatura Mezclado/Digestión	°C	160	170
Temperatura Compactación	°C	145	160

4.1.2.5.1. Módulo Resiliente a 15°C y 25°C

La determinación de este parámetro se realiza según el procedimiento descrito en la norma europea UNE-EN 12697-26:2006, anexo C, que mediante ensayos de tracción indirecta permite caracterizar la rigidez de una mezcla asfáltica bajo cargas repetidas en el rango elástico lineal, los cuales son efectuados con probetas cilíndricas tipo Marshall compactadas con 75 golpes por cara.

La caracterización de cada tipo de mezcla según este parámetro se realiza a 15°C y 25°C, las cuales son temperaturas intermedias a las que normalmente se encuentran los pavimentos en servicio.

En la Tabla 4-21 se muestran los resultados obtenidos para los módulos resilientes (MR) a ambas temperaturas, el efecto de la incorporación de polvo de caucho en la rigidez tomando la mezcla asfáltica tradicional como patrón de comparación ($\Delta MR_{\% \text{Caucho}} / MR_{\text{Sin Caucho-1}}$) y la susceptibilidad térmica obtenida a partir de la variación de este parámetro con la temperatura ($\Delta MR_{T^\circ} / MR_{15^\circ \text{C}}$).

Tabla 4-21. Módulo resiliente y sensibilidad a la temperatura

Tipo de Mezcla	MR [MPa]		Variación MR [%]		Variación a T° [%]
	15°C	25°C	15°C	25°C	
Sin Caucho-1	6130	1937	0	0	68
Caucho-1 (2hrs.)	9130	4029	49	108	56

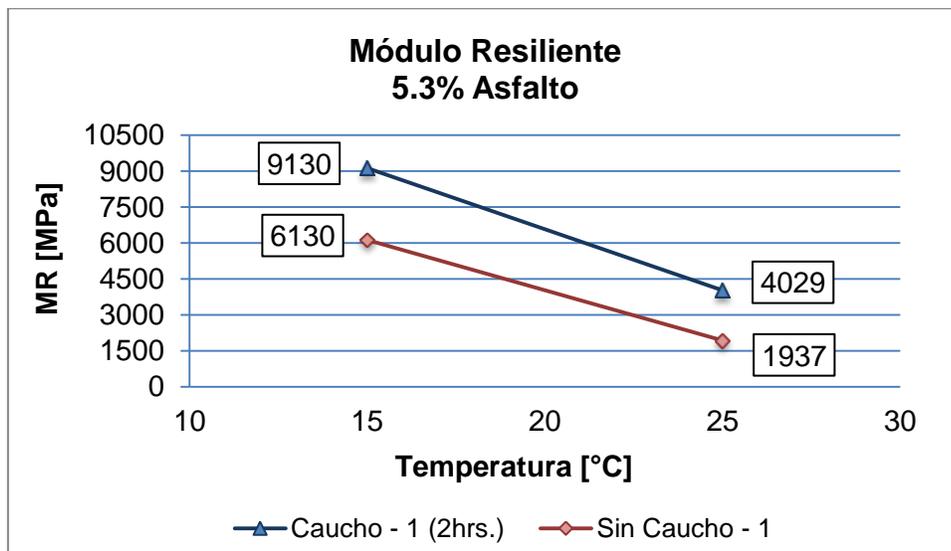


Figura 4-8. Módulo resiliente y sensibilidad a la temperatura.

De la Tabla 4-21 se observa que los módulos resilientes de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho son considerablemente mayores a los de la mezcla asfáltica sin su incorporación, para ambas temperaturas. En términos comparativos, se observa que el incremento de la rigidez por la adición de polvo de caucho, es más importante a mayor temperatura. Este efecto es muy beneficioso para evitar el ahuellamiento de los pavimentos (deformación plástica), fenómeno que se produce especialmente en tiempos cálidos debido a la disminución de la viscosidad del asfalto con el calor (comportamiento termoplástico del asfalto).

En cuanto a la susceptibilidad térmica, en la mezcla asfáltica con adición de polvo de caucho, la variación del módulo resiliente es menor que en la mezcla sin su incorporación. El tener mezclas asfálticas con baja sensibilidad a la temperatura es necesario en especial cuando se requieren pavimentos en zonas de climas extremos, con gran oscilación térmica.

Estos resultados son de suma importancia, y más aun teniendo en consideración que en los métodos de diseño mecanicistas de pavimentos flexibles, un valor alto de módulo resiliente, como los obtenidos para la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho, posibilitaría la disminución del espesor de la capa asfáltica de rodadura (para igual condiciones de tránsito y servicio) y, por lo tanto, una disminución de los costos.

4.1.2.5.2. Resistencia a Compresión Diametral

Para caracterizar los distintos tipos de mezclas asfálticas según sus resistencias a tracción indirecta (compresión diametral), se lleva a cabo el procedimiento descrito en la norma española NLT-346/90. Este se efectúa sobre probetas cilíndricas tipo Marshall compactadas con 75 golpes por cara.

En la Tabla 4-22, se presentan los resultados obtenidos para la resistencia a compresión diametral (Rt) de los distintos tipos de mezclas asfálticas en estudio y el aumento porcentual de la resistencia respecto a la mezcla asfáltica convencional tomada como patrón de comparación ($\Delta R_t \%_{\text{Caucho}} / R_t_{\text{Sin Caucho-1}}$).

Tabla 4-22. Resistencia a compresión diametral.

Tipo de Mezcla	Rt [MPa]	Variación [%]
Sin Caucho-1	0.96	0
Caucho-1 (2hrs)	1.27	33

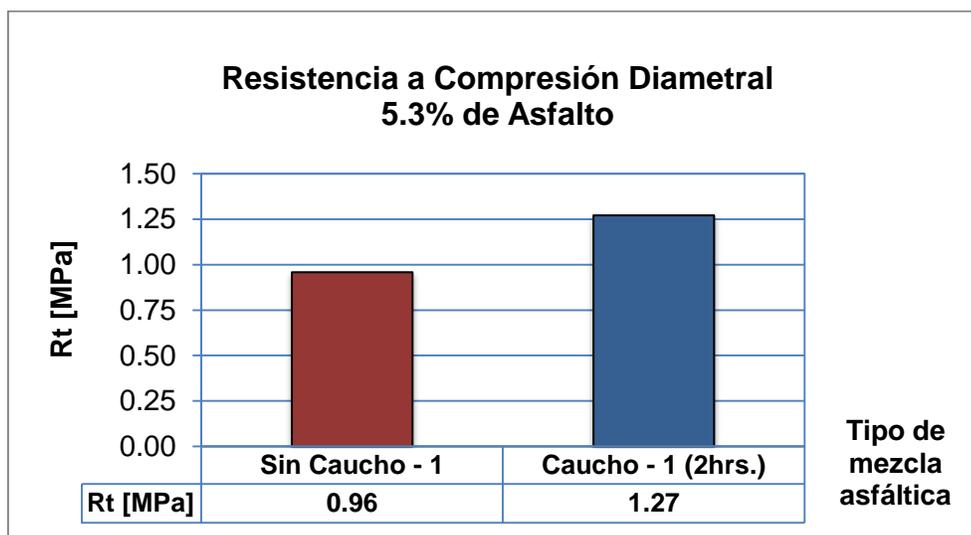


Figura 4-9. Resistencia a compresión diametral.

La resistencia a tracción indirecta refleja principalmente la capacidad del ligante de resistir los esfuerzos de tracción que se generan de manera casi uniforme en el diámetro vertical de las probetas cilíndricas ensayadas (sometidas a una carga de compresión diametral creciente en todo su largo), y que está definida principalmente por su cohesión, es decir, la propiedad de mantener ligadas las partículas de árido.

De los resultados obtenidos, la resistencia a tracción indirecta de la mezcla asfáltica con polvo de caucho es superior al de la mezcla sin su incorporación (la resistencia aumenta un 33%), esto debido a que el caucho aumenta la viscosidad del ligante, provocando en definitiva que este mejore su capacidad cohesiva.

4.1.2.5.3. Ahuellamiento bajo agua a 50°C

El ensayo de ahuellamiento se realiza bajo agua a 50°C con el dispositivo Rueda de Hamburgo, según el procedimiento descrito en la norma americana AASHTO T324-

04. Para el ensayo se utilizan probetas cilíndricas de 150mm de diámetro y aproximadamente 60mm de altura, compactadas mediante el compactador giratorio hasta la densidad de terreno mínima exigida de 97% la densidad Marshall de diseño.

En el gráfico Profundidad de Ahuellamiento versus el número de pasadas de rueda (Figura 4-10), se muestran las curvas representativas de ambos tipos de mezclas asfálticas analizadas. A partir de estas, se caracterizan las mezclas según los siguientes parámetros.

- **SIP:** Punto de desprendimiento de la película de asfalto que recubre a los agregados debido a la penetración del agua. Marca el inicio de la disgregación de la mezcla. Se determina a partir del segundo cambio de curvatura en la curva (N° Pasadas).
- **NF:** Número de pasadas de la rueda en la falla (N° Pasadas).
- **Ah:** Ahuellamiento (mm).
- **CS:** Pendiente de deformación antes del SIP (mm/1000 Pasadas). Caracteriza la resistencia a la deformación permanente de la mezcla sometida a carga repetida.
- **SS:** Pendiente de desprendimiento después del SIP. Caracteriza la deformación sufrida por el desprendimiento del material granular sin aporte del ligante (mm/1000 Pasadas).

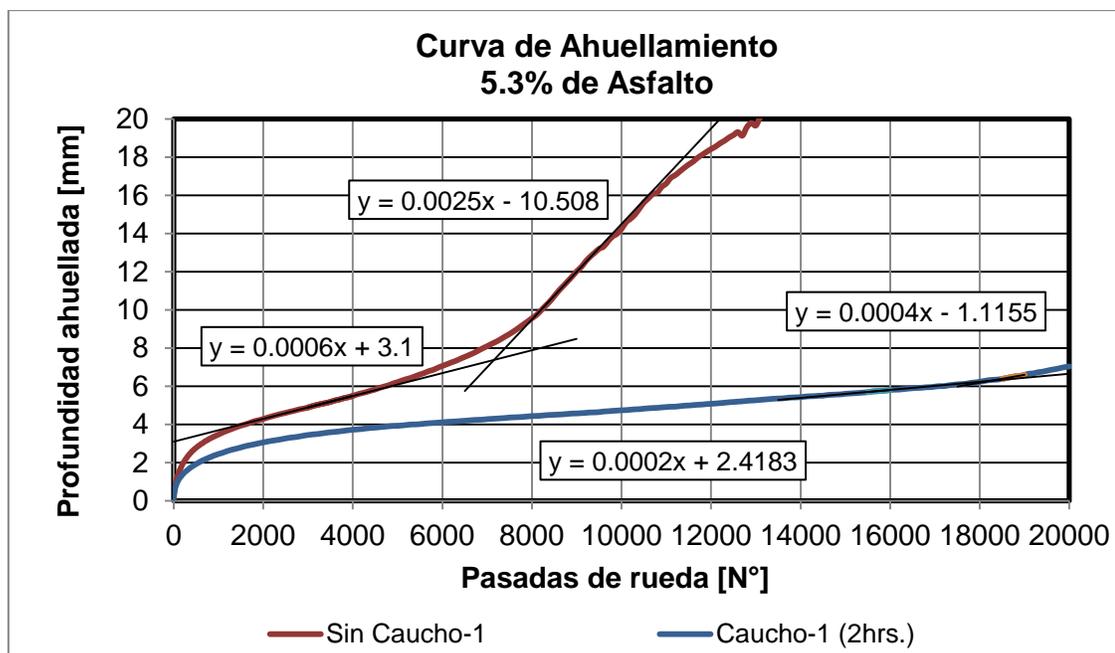


Figura 4-10. Ahuellamiento bajo agua a 50°C por ensayo de Hamburgo.

En la Figura 4-10 y en la Tabla 4-23, se observa que la mezcla asfáltica tradicional se deforma rápidamente superando los 20mm de ahuellamiento antes de concluir las 20000 pasadas, a diferencia de la mezcla modificada con polvo de caucho, que alcanza ese número de pasadas con profundidades del orden de los 7mm.

Tabla 4-23. Condición de término en ensayo de Hamburgo.

Mezcla	NF	Ah _{NF} máximo
	[N° Pasadas]	[mm]
Sin Caucho-1	13300	20.8
Caucho-1 (2hrs.)	20000	7.0

Para el número de falla (NF) de la mezcla asfáltica sin incorporación de caucho (13300 pasadas de rueda), se determinan las profundidades de ahuellamiento porcentual respecto a la altura de la probeta (60mm). Esto se muestra en la Tabla 4-24, para ambos tipos de mezclas asfálticas evaluados. En la mezcla asfáltica tradicional, la huella alcanza una profundidad de 35% de la altura de la probeta, a diferencia de la mezcla con incorporación de polvo de caucho, donde la profundidad relativa es de 9%.

Tabla 4-24. Ahuellamiento en la falla de la mezcla asfáltica convencional.

Mezcla	NF _{Sin Caucho-1}	Ah _{NF sin caucho-1}	
	[N° Pasadas]	[mm]	[%]
Sin Caucho-1	13300	20.8	35
Caucho-1 (2hrs.)		5.3	9

En la Tabla 4-25, se presentan los restantes parámetros de caracterización obtenidos en el ensayo. Se observa que la mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho presenta mayor resistencia a la disgregación (SIP) que la mezcla asfáltica tradicional, lo que es indicativo de que el caucho mejora la adherencia árido-ligante, retrasando la penetración del agua en la película de asfalto y el consecuente despegue de las partículas de árido. Es importante asegurar la resistencia a la desintegración de la mezcla, ya que al desgastarse el pavimento baja su espesor y en consecuencia se pierde estructura.

Por otro lado, las velocidades de deformación antes y después del punto de desprendimiento (SIP), caracterizadas por la pendiente CS y SS respectivamente, son notoriamente más bajas en la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho que en la mezcla asfáltica sin la incorporación de este polímero. En este último caso, la acción del agua después del SIP, se hace evidente y su efecto muy desfavorable; se alcanza la falla por deformación (20mm) rápidamente. Muy por el contrario, en el caso de las mezclas asfálticas con polvo de caucho, ambas pendientes (CS y SS) se mantienen casi constantes, lo que indica que a pesar de la penetración del agua (después del SIP), el desprendimiento de árido y por ende la deformación producida por su efecto, son mínimos. De esta manera, la mayor cohesividad producto de la incorporación de polvo de caucho, confiere a las mezclas una mayor resistencia a la pérdida de partículas.

Tabla 4-25. Parámetros de ahuellamiento por ensayo de Hamburgo.

Mezcla	SIP	Ah _{SIP}	CS	SS
	[N° Pasadas]	[mm]	[mm/1000 Pasadas]	[mm/1000 Pasadas]
Sin Caucho-1	7162	6.1	0.6	2.5
Caucho-1 (2hrs.)	17669	8.3	0.2	0.4

4.1.3. Confección de la capa asfáltica de rodadura en el Tramo de Prueba

4.1.3.1. Fabricación en Planta y colocación en terreno

Los trabajos de fabricación y colocación de la mezcla asfáltica con polvo de caucho en el Tramo de Prueba se desarrollan en las fechas señaladas en la Tabla 4-26. La mezcla asfáltica modificada es preparada en una Planta Asfáltica ubicada en la Región Metropolitana, comuna de Peñalolén (ubicada aproximadamente a una hora de la Obra).

Tabla 4-26. Fechas de la pavimentación del Tramo de Prueba.

Faja	Pista		Berma
Izquierda	N° 2	13.09.2012	14.09.2012
Derecha	N° 1	26.09.2012	26.09.2012

La Planta es continua con un tambor secador - mezclador (el secado del árido así como la confección de la mezcla, se realizan en el mismo tambor), y su funcionamiento y principales componentes se resumen a continuación.

- Los agregados fríos almacenados en las tolvas, son alimentados a la cinta transportadora que finalmente descarga los agregados en el tambor para su secado (primera parte del tambor).
- Los colectores de polvo remueven el exceso de polvo del escape del secador y lo vuelve a incorporar al final del tambor.
- A los agregados ya secos y calientes, se les incorpora el polvo de caucho alimentado en frío desde una tolva dispuesta al final del tambor.
- Finalmente, a la mezcla de árido y polvo de caucho se le incorpora el cemento asfáltico a la temperatura de mezclado (final del tambor).
- La mezcla asfáltica terminada es descargada inmediatamente a los camiones para ser transportada a terreno (inicio del proceso de digestión).

Los equipos para la ejecución de los trabajos de colocación en terreno son los siguientes:

- 1 terminadora autopropulsada (finisher) de 5m de ancho.
- 1 rodillo liso.
- 1 rodillo neumático.
- 1 densímetro nuclear.
- equipamiento como rastrillo, palas, carretillas, termómetros, etc.

Los trabajos de colocación de la mezcla asfáltica modificada en terreno (Tramo de Prueba), se detallan en las siguientes imágenes:



Figura 4-11. Confección de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho en la Planta Asfáltica.



Figura 4-12. Preparación de la superficie (riego de liga) para colocación de la mezcla asfáltica modificada.



Figura 4-13. Transporte de la mezcla en camiones cubiertos y carga de la finisher.



Figura 4-14. Colocación de la mezcla en el espesor proyectado.



Figura 4-15. Compactación de la mezcla (rodillo liso y rodillo neumático).



Figura 4-16. Chequeo de la densidad (densímetro nuclear) y la temperatura durante la compactación.



Figura 4-17. Apertura al tránsito y demarcación del pavimento.

4.1.3.2. Antecedentes

4.1.3.2.1. Control de temperaturas en el Tramo de Prueba

El éxito en construir un pavimento de calidad, con las propiedades deseadas, no es solo dado por un buen diseño y preparación de la mezcla asfáltica en caliente, también es de suma importancia su correcta colocación y compactación, procesos en que la temperatura juega un rol fundamental.

Las áreas con mezcla más frías son relativamente rígidas y resistentes a la compactación, lo que trae como consecuencia además de una densidad menor a la especificada en el Proyecto (no inferior a 97% de la densidad de diseño para calzada y 96% para berma), zonas propensas a fallas prematuras, con textura superficial inadecuada o con defectos superficiales, tales como ahuellamiento, ondulaciones, fisuras, etc.

Para evitar el enfriamiento prematuro de la mezcla asfáltica, el proceso de compactación se debe iniciar lo antes posible y con la mezcla a temperatura elevada, para tal efecto, los rodillos deben ir tan próximos a la finisher como sea posible y las condiciones climáticas deben ser las adecuadas.

En las especificaciones nacionales para mezclas asfálticas convencionales (5.408.303(2) del M.C.-V.5), se señala que la compactación se debe realizar cuando la temperatura de la mezcla este comprendida entre 110°C y 140°C, la temperatura atmosférica no sea inferior a 5°C y el tiempo no este ni brumoso ni lluvioso. Sin embargo, en las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho se deben extremar estas condiciones, dado que presentan una mayor viscosidad y su pérdida de temperatura es más rápida en relación a ellas.

A modo de antecedente, para la posterior evaluación de la calidad del Tramo de Prueba, se presenta en la Tabla 4-27 las condiciones ambientales y las temperaturas de la mezcla asfáltica modificada desde su salida en la Planta hasta su colocación y compactación en Obra.

Tabla 4-27. Control de temperaturas en el Tramo de Prueba.

Temperatura [°C]		Pista N° 2	Pista N° 1+ Berma
Ambiente		24	20
Mezcla	Salida de Planta	175	175
	Extensión	155	155
	Compactación	150	140

Se debe tener presente que la temperatura de extensión corresponde a la temperatura una vez cumplido el tiempo de digestión de dos horas como mínimo. Además, como es posible apreciar en la Tabla 4-27, el proceso de mezclado en Planta se decide efectuar a 175°C (temperatura a la salida de la planta), para que el proceso de digestión se realice según lo establecido en el diseño, a 170°C (ver fórmula de trabajo en Tabla 4-19), considerando que en las dos horas de digestión la temperatura desciende entre 5 y 10°C.

Sin embargo, como es posible observar en la Tabla 4-27, el proceso de compactación se desarrolló a temperaturas muy inferiores a las proyectadas (160°C), particularmente en la Pista N° 1. Esto se produjo debido a que el plan de compactación, con un solo rodillo de cada tipo, resultó insuficiente. En efecto, en la compactación de la junta transversal en la pista N° 1 (inicio del proceso de compactación), se requirieron varias pasadas de los rodillos, de manera que estos no pudieron ir próximos a la finisher, que extiende la mezcla de manera casi continua. Esto provocó un retraso generalizado de la compactación de la pista y la mezcla asfáltica modificada colocada se enfrió rápidamente.

4.1.3.2.2. Singularidades

A continuación se presentan las singularidades más importantes presentadas desde Km 0.077 al Km 1.000, tales como paraderos y accesos (calles laterales, accesos a recintos privados, etc.).

Tabla 4-28. Singularidades (Km 0.077 al Km 1.000).

	Km _i	Km _f	Singularidades		Km _i	Km _f	Singularidades
	Faja Derecha	0.727	0.807		Accesos Principales	Faja Izquierda	0.308
0.128		0.128	Accesos en General	0.460			
0.275		0.275		0.612			
0.880		0.880		0.804			
0.260		0.317	Paraderos	0.146	0.203		Paraderos
0.807		0.862		0.869	0.926		

4.1.4. Controles Receptivos

Los ensayos para determinar las características y calidad del pavimento en el Contrato, tanto en el sector del Tramo de Prueba, confeccionado con la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho, como en el sector confeccionado con la mezcla asfáltica tradicional (capa de rodadura), se resumen en la Tabla 4-29. Las características a medir, junto con el clima, el medioambiente y el tránsito de vehículos, son las variables que determinan el comportamiento real del pavimento, por eso es de importancia su cuantificación.

Estos métodos permiten establecer tanto la condición estructural del pavimento, definida por su capacidad para resistir las sollicitaciones generadas por las cargas solicitantes y que está asociada al tipo de material y los espesores utilizados en las distintas capas estructurales, como también su condición funcional, que valora cuán bien este se comporta para satisfacer los requerimientos de los usuarios, asociada a la confortabilidad y seguridad que provee su capa de rodadura. Respecto a este último aspecto, se debe tener presente que la capacidad para proveer una superficie segura para el frenado de los vehículos y los virajes en curvas (resistencia al deslizamiento), adaptada a las velocidades de circulación proyectadas para el camino, depende de la calidad de la textura superficial de un pavimento.

En el Capítulo 8.500, Auscultaciones y Prospecciones, del Volumen N° 8 del Manual de Carreteras se describen la mayoría de los procedimientos para medir y valorar el estado de un pavimento terminado. Los otros métodos señalados, para analizar las mezclas asfálticas, se describen en el Capítulo 8.302 del mismo Volumen.

Tabla 4-29. Controles receptivos en el Contrato Reposición Ruta G-184.

Control	Metodología de ensayo			Tramo de Prueba	Tramo con mezcla asfáltica tradicional
	Variable medición	Equipo/Muestra	Método		
Condiciones Estructurales	Contenido de asfalto	Mezcla asfáltica	8.302.56	√	
	DMM		8.302.37	√	
	Espesor	Testigos extraídos del pavimento	8.302.38	√	√
	Compactación		8.302.41	√	√
	Contenido de Huecos		8.302.47	√	√
	Módulo Resiliente		UNE - EN 12697 - 26	√	
	Deflexiones		Deflectómetro de Impacto (FWD)	8.502.5	√
8.502.6					
Condiciones Funcionales	Rugosidad (IRI)	Perfilómetro Láser	8.502.8	√	√
	Ahuellamiento	Perfilómetro Láser	8.502.11	√	√
	Resistencia al Deslizamiento	SCRIM	8.502.17	√	√
	Macrotextura	Equipo del Círculo Arena	8.502.14	√	
		Perfilómetro Láser	8.502.15	√	√

Además de caracterizar y comparar los pavimentos confeccionados con ambos tipos de mezclas asfálticas en su capa de rodadura, según las propiedades señaladas, adicionalmente se verifica la calidad del Tramo de Prueba aplicando las especificaciones de las mezclas asfálticas en caliente convencionales, descritas en los numerales 5.408.303 y 5.408.304 del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras. Estos controles a pesar de ser específicos para capas superficiales con mezclas convencionales, establecen valores umbrales máximos permisibles (estándares mínimos de calidad) para las condiciones de seguridad, comodidad y capacidad estructural requeridas para la adecuada circulación de los vehículos, que deben ser independientes del tipo de mezcla asfáltica a colocar en el pavimento. Estas especificaciones tienen como objetivo asegurar que las Obras conserven, por el periodo de tiempo para la cual fueron concebidas, las condiciones señaladas, soportando las condiciones climáticas y de entorno de la zona en que se ubica la vía.

En este caso particular, por tratarse de un tramo experimental, las mediciones se realizan según la necesidad y de acuerdo a la longitud de este (se deben tener suficientes datos para los análisis pero sin llegar a afectar las propiedades del pavimento). Se debe tener presente, que a pesar de que los parámetros a medir deben

dar cumplimientos a lo contratado, los tramos de prueba no están afectos a multas por tratarse de tramos para estudio.

4.1.4.1. Controles a mezclas asfálticas

Inicialmente, se efectúan controles durante la pavimentación de la capa de rodadura confeccionada con la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho por vía seca (Tramo de Prueba). No es posible realizar los controles en el tramo fabricado con la mezcla asfáltica tradicional, dado que su pavimentación (Mayo 2012) se realiza con anterioridad al inicio de este estudio.

La evaluación de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho se efectúa a partir de muestras individuales tomadas desde la Finisher, durante su colocación en terreno, y son representativas de la mezcla transportada por un solo camión. A las muestras se les realizan los controles para determinar su contenido de asfalto y su densidad máxima sin compactar (DMM), ambos son parámetros de diseño, que permiten evaluar la calidad de la mezcla fabricada en Planta (donde las condiciones no son las óptimas como en Laboratorio).

4.1.4.1.1. Control del Contenido de asfalto

La determinación del contenido de asfalto, para verificar que la mezcla asfáltica en terreno cumple con el porcentaje óptimo de asfalto según el diseño, se realiza a través del Método por Ignición descrito en 8.302.56 del M.C-V.8. Dado que el tamaño máximo nominal del agregado de la mezcla es de 20mm (90%-100% pasa por Tamiz ASTM 3/4”), el tamaño mínimo de la muestra asfáltica de ensaye, es de 2000g.

4.1.4.1.1.1. Mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho

- **Factor de corrección**

Previo a la determinación de los contenidos de asfalto de las muestras tomadas en terreno, se debe determinar el factor de corrección de la mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho por vía seca. Para esto, se calcinan dos muestras de mezcla asfáltica (2000g) en el Horno de Ignición, las cuales son preparadas en Laboratorio, dosificadas de acuerdo al diseño con 5.3% de asfalto y 0.5% de polvo de caucho, ambos porcentajes referidos al peso del agregado, y sometidas al proceso de digestión de 2hrs. a 170°C. Los valores resultantes de la ignición de ambas mezclas se muestran en la Tabla 4-30.

Tabla 4-30. Ignición de muestras confeccionadas en Laboratorio, mezcla asfáltica modificada por vía seca.

Horno de Ignición	Unidad	Mezcla 1	Mezcla 2
Contenido de asfalto sin corregir	[%]	6.28	6.32

A partir de la diferencia entre el porcentaje de asfalto determinado por ignición y el porcentaje de asfalto con que se dosifican las mezclas, se calculan los factores de corrección para cada una de ellas. El promedio de ambos, define el factor de corrección (FC) característico de la mezcla. Los valores individuales y el factor de corrección final se muestran en la Tabla 4-31.

Tabla 4-31. Factor de corrección por agregado y polvo de caucho, mezcla asfáltica modificada por vía seca.

Factor de Corrección	Unidad	Mezcla 1	Mezcla 2
Valores Individuales	[%]	0.98	1.02
Promedio	[%]	1.00	

El factor de corrección representa la pérdida por ignición de los componentes de una mezcla asfáltica sin considerar el asfalto quemado. En mezclas convencionales, este factor sólo queda determinado por una pequeña fracción de agregado que se calcina (finos principalmente), y son habituales valores del orden de 0.3 a 0.4% para capas de rodadura, sin embargo, en mezclas modificadas con polvo de caucho por vía seca, este factor debe quedar definido, además del árido, por el caucho. A esto puede atribuirse el alto factor de corrección de 1.0% obtenido. A partir de estos resultados, se puede inferir que la pérdida por ignición de la mezcla modificada es la suma del contenido de asfalto más parte del polvo de caucho y el agregado, que también se calcinan.

Finalmente, a los contenidos de asfalto obtenidos por el Método de Ignición se les debe restar el factor de corrección calculado, como se muestra en la Ecuación 4-1.

$$Pt = P_{HI} - FC$$

Ecuación 4-1

Dónde:

FC [%r. a.]: **Factor de corrección.**

P_{HI} [%r. a.]: **%Asfalto obtenido en el Horno de Ignición (sin corregir).**

Pt [%r. a.]: **%Asfalto corregido referido al peso del agregado.**

- Evaluación del porcentaje de asfalto corregido

Para evaluar los contenidos de asfalto de las muestras de mezcla asfáltica con polvo de caucho, se aplican los mismos criterios que las mezclas asfálticas convencionales. En estas, el contenido de asfalto corregido (P_t) obtenido de las muestras incineradas, se evalúan según el procedimiento descrito en 5.408.304(3) del M.C.-V.5. Para carpetas de rodadura, se establece que una muestra individual es aceptable si su porcentaje de asfalto calibrado (P_t) queda comprendido en $P_b \pm 0.3\%$, siendo P_b el porcentaje de asfalto óptimo de la dosificación de diseño (5.3% referido al peso del agregado).

En las tablas siguientes, se presentan los resultados obtenidos de la ignición de las muestras, según pista/berma y kilometraje, corregidas (P_t) y sin corregir (P_{HI}). Se incluye además la diferencia entre el porcentaje de asfalto corregido con el de la dosificación de diseño ($P_t - P_b$), que debe estar comprendida en $\pm 0.3\%$, según lo señalado.

- **Faja Derecha: Pista N° 1 + Berma.**

Tabla 4-32. Control del contenido de asfalto en el Tramo de Prueba, faja derecha.

Muestra	Km	P_{HI} [%]	FC [%]	P_t [%]	$P_t - P_b$ [%]
Pista N° 1 + Berma Derecha.	0.250	5.36	1.00	4.36	-0.9
	0.340	5.62		4.62	-0.7

- **Faja Izquierda: Pista N° 2 + Berma.**

Tabla 4-33. Control del contenido de asfalto en el Tramo de Prueba, faja izquierda.

Muestra	Km	P_{HI} [%]	FC [%]	P_t [%]	$P_t - P_b$ [%]
Pista N° 2	0.370	6.03	1.00	5.03	-0.3
	0.300	5.48		4.48	-0.8
Berma Izquierda	0.150	5.51	1.00	4.51	-0.8

De los resultados obtenidos, ninguna muestra, a excepción de una, verifica la tolerancia exigida. Los contenidos de asfalto presentan diferencias con la dosificación de diseño que bordean el 0.8%, saliéndose del rango aceptable ($\pm 0.3\%$). Se debe tener presente, que en el Manual de Carreteras (5.408.304(3) del M.C.-V.5) se establece que la variación absoluta del contenido de asfalto de una muestra individual de la capa de rodadura, debe estar comprendido en 0.5%, de lo contrario el área representativa de dicha muestra estaría afecto a 100% de multa o se tendría que rehacer.

Los resultados obtenidos no permiten comprobar el factor de corrección determinado en Laboratorio de 1.0% para la mezcla asfáltica modificada. Esta calibración parece ser muy estricta, y demostraría que gran parte del caucho de las muestras fabricadas en Planta, no está siendo calcinando y solo lo está haciendo el árido.

Para establecer un valor estimativo de la influencia del árido en el factor de corrección de la mezcla, se procede a determinar el factor de corrección exclusivo del agregado. Para esto, se ocupa el otro método disponible en el Manual de Carreteras (8.302.56 del M.C-V.8) para definir el factor de calibración, el cual consiste en quemar una muestra de los agregados sin ligante asfáltico ni polvo de caucho, que es preparada de acuerdo con la mezcla de diseño. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 4-34. Factor de corrección por agregado.

Horno de Ignición	Unidad	Agregado
Factor de Corrección	[%]	0.28

Dado que la pérdida por agregado más polvo de caucho ($0.5\% + 0.28\% = 0.78\%$), suponiendo que este último se quema de manera integral al calcinar la mezcla asfáltica modificada, es menor que el FC de 1.0% obtenido, se concluye que la incorporación de polvo de caucho en las mezclas podría generar más pérdida por árido que las mezclas asfálticas tradicionales¹⁰(se calcina más árido al incorporar caucho a la mezcla).

En la Tabla 4-35, se presentan los contenidos de asfalto de todas las muestras ensayadas, corregidos sólo por el factor de corrección tentativo por agregado.

Tabla 4-35. Control del contenido de asfalto en el Tramo de Prueba (factor de corrección por agregado).

Muestra	Km	P _{HI} [%]	FC [%]	P _t [%]	P _t - P _b [%]
Pista N° 1 y Berma Derecha	0.250	5.36	0.28	5.08	-0.2
	0.340	5.62		5.34	0.0
Pista N° 2	0.370	6.03		5.75	0.5
	0.300	5.48		5.20	-0.1
Berma Izquierda	0.150	5.51		5.23	-0.1

¹⁰ Las mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho, sometidas a la ignición en el Horno fueron alrededor de ocho, y todas arrojaron porcentajes de pérdida por ignición de 1.0%.

Todas las muestras, salvo una, verifican este factor de corrección. Esto demostraría que el factor de calibración para estas mezclas especiales, es variable y quedaría comprendido entre el factor de corrección por agregado (producto de la calcinación de la mezcla de áridos) y el factor de corrección por agregado más polvo de caucho (producto de la calcinación de dos muestras de mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho).

4.1.4.1.2. Control de la Densidad máxima de la mezcla (DMM)

La determinación de la densidad máxima de la mezcla (DMM) de las muestras de mezcla asfáltica tomadas en terreno, se realiza a través del Método descrito en 8.302.37 del M.C-V.8. Dado que el tamaño máximo nominal del agregado de la mezcla es de 20mm (Tamiz ASTM 3/4"), el tamaño mínimo de la muestra de ensaye, es de 2000g.

La densidad máxima de la mezcla (DMM) se compara con la obtenida en la dosificación de diseño visada (análisis Marshall realizado a la mezcla asfáltica). No hay especificaciones relativas a este parámetro de diseño, pero en general se considera como valores razonables que el DMM de terreno este en el rango de $\pm 20\text{kg/m}^3$ del DMM de diseño.

Además, una vez obtenida la densidad de los testigos extraídos en el pavimento del Tramo de Prueba, se puede calcular con el DMM de terreno, el porcentaje de huecos de la capa asfáltica de rodadura.

4.1.4.1.2.1. Mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho

Los resultados del DMM de dos muestras de mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho por vía seca se presentan en la Tabla 4-36. Estos valores se comparan con el DMM de diseño (Tabla 4-18).

Tabla 4-36. Control de la densidad máxima de la mezcla, Tramo de Prueba.

Pista N°	Km	DMM [kg/m ³]	DMM diseño [kg/m ³]
1	0.250	2462	2464
2	0.370	2479	

Como es posible observar, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango recomendado.

4.1.4.2. Controles al pavimento terminado

Una vez terminado el Contrato, se procede a la realización de los ensayos para determinar las características y calidad de la obra de pavimentación (condiciones funcionales y estructurales), tanto en el Tramo de Prueba como en el tramo fabricado con la mezcla asfáltica tradicional en su capa de rodadura.

4.1.4.2.1. Controles a Testigos

A partir de testigos cilíndricos extraídos tanto en el Tramo de Prueba como en el tramo con mezcla asfáltica tradicional, se determinan espesores, densidades y contenido de huecos del respectivo concreto asfáltico de la capa de rodadura. Además, sólo para el caso del Tramo de Prueba, se determinan los módulos resilientes a 15°C y 25°C de los testigos respectivos. Estos ensayos tienen como propósito verificar el cumplimiento de las especificaciones de diseño por parte de estos parámetros, lo que asegura en la mayor medida posible la calidad y duración de las obras contratadas y la disminución de los costos de mantenimiento.

En el caso del Tramo de Prueba, los testigos se extrajeron el 20.11.2012, aproximadamente dos meses después del término de las faenas de pavimentación, a excepción de los testigos en el Km 0.290 (pistas N° 1 y N° 2) que se tomaron el 4.10.2012. La extracción de las muestras se realiza en la huella externa de cada pista (calzada), a aproximadamente 70cm de su borde, a intervalos de 100m (excepto la del Km 0.290). En el caso del tramo con mezcla asfáltica tradicional, los testigos se extrajeron el 04.10.2012, a aproximadamente dos meses de dado el tránsito en ese sector (la construcción con mezcla tradicional es anterior al Tramo de Prueba). La extracción de las muestras se realiza por pista, también en la huella externa, donde cada testigo es representativo de un segmento de tramo de 500m (área de 1750m² por pista) o fracción.



Figura 4-18. Testigos extraídos del pavimento (carpeta + binder).

4.1.4.2.1.1. Control de la Compactación

La compactación de la capa de rodadura se evalúa a partir de la medición de la densidad realizada a los testigos, determinada con el método 8.302.38 del M.C-V.8. La evaluación se realiza por muestras individuales según lo establecido para calzadas en 5.408.304(1) del M.C-V.5, en donde se exige que el porcentaje de compactación de cada testigo sea mayor o igual a 97% de la densidad de diseño Marshall. Este requerimiento permite asegurar un adecuado porcentaje de huecos en la capa asfáltica para resistir la consolidación final por el tránsito (aumento de la densidad), sin exudaciones. Además, es importante para prevenir filtraciones de agua a las capas inferiores, reducir la oxidación del asfalto, y para proveer una adecuada resistencia al corte (ahuellamiento).

Los porcentajes de compactación de los testigos se presentan en las Tabla 4-37 y Tabla 4-38. Se debe tener en cuenta que en el Tramo de Prueba, la densidad Marshall es 2313kg/m^3 , y en el caso del tramo con la mezcla convencional, la densidad de diseño es 2362kg/m^3 .

- **Pista N° 1**

Tabla 4-37. Control de la compactación, pista N° 1.

N° Testigo	Km puntual	Densidad	Densidad Promedio	Densidad Marshall	Compactación	Tipo de mezcla asfáltica
		[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[%]	
1c	0.100	2214	2182	2313	96	Mezcla con polvo de caucho
3c	0.200	2194			95	
5c	0.290	2171			94	
7c	0.300	2210			96	
9c	0.400	2120			92	
1sc	0.752	2350	2314	2362	99	Mezcla tradicional
3sc	1.252	2353			100	
5sc	1.752	2233			95	
7sc	2.252	2358			100	
9sc	2.551	2277			96	

- Pista N° 2

Tabla 4-38. Control de la compactación, pista N° 2.

N° Testigo	Km puntual	Densidad Terreno	Densidad Promedio	Densidad Marshall	Compactación	Tipo de mezcla asfáltica
		[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]	
2c	0.150	2227	2241	2313	96	Mezcla con polvo de caucho
4c	0.250	2277			98	
6c	0.290	2218			96	
8c	0.350	2251			97	
10c	0.450	2233			97	
2sc	0.752	2310	2333	2362	98	Mezcla tradicional
4sc	1.252	2309			98	
6sc	1.752	2369			100	
8sc	2.252	2322			98	
10sc	2.551	2356			100	

En el Tramo de Prueba, los resultados de la compactación de la capa de rodadura son bajos. En la pista N° 1, las densidades de los testigos fluctúan entre 92% y el 96% de la densidad Marshall, con un promedio de 2182kg/m³ (94%), y de las cinco muestras evaluadas, ninguna verifica la especificación. En la pista N° 2, los resultados son mejores, la compactación de las muestras fluctúan entre 96% y 98%, con una densidad promedio de 2241kg/m³ (97%), y al menos tres muestras (de cinco) cumplen la compactación mínima requerida.

Por el contrario, en el tramo con mezcla asfáltica tradicional, los resultados de la compactación son más altos en relación al tramo experimental. En la pista N° 1, las densidades fluctúan entre 95% y 100%, con un promedio de 2314kg/m³ (98%), y de las cinco muestras, solo dos no cumplen el requerimiento mínimo. En la pista N° 2, la compactación de las muestras fluctúan entre 98% y 100%, con una densidad promedio de 2333kg/m³ (99%) y todas las muestras (cinco) verifican la especificación.

Se debe tener presente, que en el Manual de Carreteras (5.408.304(1) del M.C.-V.5) se establece que el porcentaje de compactación de una muestra individual representativa de un área de 1750m², debe ser superior o igual a 95% de la densidad de diseño, de lo contrario el área representativa de dicha muestra estaría afecto a 100% de multa o se tendría que rehacer.

- **Contenido de vacíos de aire (Va)**

Con la densidad promedio de los testigos extraídos en el Tramo de Prueba y el DMM de las muestras de mezcla asfáltica (Tabla 4-36), se calcula el porcentaje de huecos (Va) de la capa de rodadura en cada pista (procedimiento en 8.302.47 - 4.7 del M.C.-V.8). Los resultados se presentan en la Tabla 4-39.

De igual manera, para el sector con mezcla asfáltica tradicional se determina el porcentaje de huecos de la capa de rodadura. Dado que no se cuenta con valores representativos del DMM de terreno, se utilizan el DMM determinado en la visación en Laboratorio (Tabla 4-13). Los resultados se presentan en la Tabla 4-40.

Tabla 4-39. Contenido de huecos, Tramo de Prueba.

N° Pista	Densidad (promedio)	DMM Terreno	Va
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]
1	2182	2462	11.4
2	2241	2479	9.6

Tabla 4-40. Contenido de huecos, tramo con mezcla asfáltica tradicional.

N° Pista	Densidad (promedio)	DMM Laboratorio	Va
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]
1	2314	2486	6.9
2	2333	2486	6.3

Considerando resultados de ambas pistas, se determina el contenido de huecos promedio para la capa de rodadura, siendo el valor representativo del Tramo de Prueba de 10.5%, y el del sector con mezcla asfáltica tradicional, de 6.6%.

El contenido de vacíos es, por sí solo, uno de los parámetros de desempeño más importante de una mezcla asfáltica. Para determinar el contenido asfáltico óptimo, el criterio de diseño del método Marshall especifica un contenido de vacíos de 4 a 6% para capas de rodadura. Estos valores se refieren a la condición de la mezcla tras dos a tres años de servicio, una vez que ha sido compactada por el tráfico al 100% de la densidad Marshall. Por lo tanto, para alcanzar esta condición en terreno, es necesario compactar la mezcla hasta un nivel de vacíos cercano al 7- 8%¹¹ (97% de la densidad Marshall), ya que el tráfico densificará la mezcla hasta su nivel final, en el rango de 4 a 6%. Una sobrecompactación de la mezcla, y la consecuente disminución en el

¹¹ THENOUX, Guillermo y CARRILLO, Héctor. 2002. Análisis de casos de ahuellamiento en mezclas asfálticas chilenas. Santiago, Chile.

contenido de vacíos pueden producir el ahuellamiento y/o la exudación de la mezcla. Por otro lado, para contenidos de vacíos superiores al 8%, como en el Tramo de Prueba, la mezcla puede sufrir excesiva oxidación, agrietamiento prematuro y desintegración.

Los altos valores obtenidos para el contenido de vacíos en el Tramo de Prueba responden básicamente a la baja temperatura en que se compactó la mezcla asfáltica modificada (aproximadamente 15°C más baja que lo establecido en la fórmula de trabajo). Como se señaló anteriormente, cuando la temperatura de la mezcla baja demasiado en un sector a compactar, es difícil lograr la densidad requerida y especificada en el Proyecto.

4.1.4.2.1.2. Control del Espesor

El espesor de los testigos extraídos en la capa asfáltica de rodadura se determina con el Método descrito en 8.302.41 del M.C-V.8. En el procedimiento de evaluación por muestras individuales, descrito en 5.408.304(2) del M.C -V.5, se establece que los espesores de la capa de rodadura, deben ser mayores o iguales al espesor proyectado de 50mm, para ambos tramos (con y sin incorporación de polvo de caucho).

Los valores del espesor de la carpeta para ambas pistas se observan en la Tabla 4-41 y Tabla 4-42. Se incluyen además los promedios de cinco (eventualmente cuatro) muestras consecutivas para cada tipo de mezcla analizada.

De los resultados obtenidos, todas las muestras, salvo una extraída en el Tramo de Prueba (Km 0.100), superan el mínimo exigido.

Se debe tener presente, que en el Manual de Carreteras (5.408.304(2) del M.C.-V.5) se establece que el espesor de una muestra individual (representativa de un área de 1750m²) o el de un lote representativo de cinco muestras consecutivas, debe ser superior a 92% del espesor contratado, de lo contrario el área representativa de dicha muestra o lote estaría afecto a 100% de multa o se tendría que rehacer.

- Pista N° 1

Tabla 4-41. Control del espesor, pista N° 1.

N° Testigo	Km puntual	Espesor Terreno [mm]	Espesor Promedio [mm]	Espesor Proyecto [mm]	Tipo de mezcla asfáltica
1c	0.100	45	51	50	Mezcla con polvo de caucho
3c	0.200	52			
5c	0.290	53			
7c	0.300	54			
9c	0.400	51			
1sc	0.752	56	53	50	Mezcla tradicional
3sc	1.252	55			
5sc	1.752	52			
7sc	2.252	51			
9sc	2.551	52			

- Pista N° 2

Tabla 4-42. Control del espesor, pista N° 2.

N° Testigo	Km puntual	Espesor Terreno [mm]	Espesor Promedio [mm]	Espesor Proyecto [mm]	Tipo de mezcla asfáltica
2c	0.150	56	56	50	Mezcla con polvo de caucho
4c	0.250	55			
6c	0.290	56			
8c	0.350	54			
10c	0.450	58			
2sc	0.752	54	53	50	Mezcla tradicional
4sc	1.252	55			
6sc	1.752	50			
8sc	2.252	53			
10sc	2.551	51			

4.1.4.2.1.3. Control del Módulo Resiliente

Los resultados del módulo resiliente de los testigos extraídos en el Tramo de Prueba, determinado por compresión diametral según UNE 12697-26 (Anexo C) a 15°C

y a 25°C, se muestran en las siguientes tablas. Los valores obtenidos se comparan con los que se determinaron previamente a partir de probetas confeccionadas en Laboratorio (a iguales temperaturas).

La medición del módulo resiliente de las muestras de terreno, permite obtener información acerca del comportamiento estructural de la capa asfáltica de rodadura que está sometida a cargas repetidas en el rango elástico lineal.

- **Pista N° 1**

Tabla 4-43. Control del módulo resiliente en el Tramo de Prueba, pista N° 1.

N° Testigo	Km puntual	MR a 15°C	MR a 25°C	Tipo de mezcla asfáltica
		[MPa]	[MPa]	
1c	0.100	5224	2634	Mezcla con polvo de caucho
3c	0.200	4913	2198	
7c	0.300	5901	2780	

- **Pista N° 2**

Tabla 4-44. Control del módulo resiliente en el Tramo de Prueba, pista N° 2.

N° Testigo	Km puntual	MR a 15°C	MR a 25°C	Tipo de mezcla asfáltica
		[MPa]	[MPa]	
2c	0.150	4720	2217	Mezcla con polvo de caucho
4c	0.250	7923	4071	
8c	0.350	5723	2582	
10c	0.450	6005	2517	

Se calcula para cada pista, el módulo resiliente promedio de las muestras de terreno y su susceptibilidad térmica, para contrastarlos con los valores respectivos obtenidos en Laboratorio (Tabla 4-21). Los resultados conseguidos se muestran a continuación:

Tabla 4-45. Módulo resiliente de Terreno y Laboratorio, pista N° 1

Muestra	MR a 15°C	MR a 25°C	Susceptibilidad Térmica [MPa]
	[MPa]	[MPa]	
Terreno	5346	2537	53
Laboratorio	9130	4029	56
MR_{Terreno} / MR_{Laboratorio}	59	63	

Tabla 4-46. Módulo resiliente de Terreno y Laboratorio, pista N° 2.

Muestra	MR a 15°C	MR a 25°C	Susceptibilidad Térmica [MPa]
	[MPa]	[MPa]	
Terreno	6093	2847	53
Laboratorio	9130	4029	56
MR _{Terreno} / MR _{Laboratorio}	67	71	

En ambas pistas, las muestras de terreno tienen un módulo resiliente significativamente inferior a lo esperado, según los resultados de Laboratorio. En la pista N° 1, los valores de terreno obtenidos, para ambas temperaturas, son aproximadamente el 60% del valor de Laboratorio mientras que en la pista N° 2, llegan al 70% aproximadamente del obtenido en Laboratorio (a 15°C y 25°C). Con respecto a la susceptibilidad térmica, los valores representativos de las muestras de terreno son levemente inferiores a las determinadas en Laboratorio.

Los bajos valores obtenidos para los módulos resilientes en el Tramo de Prueba reflejan la baja densidad de compactación de los testigos extraídos (por la baja temperatura a la que se efectuó dicho proceso), pues a pesar de no tener la densidad de las probetas en Laboratorio (compactadas al 100% de la densidad de diseño), su porcentaje de compactación está muy por debajo del mínimo exigido. Por otro lado, los resultados están acorde con las diferentes temperaturas a las que se compactaron ambas pistas, donde la pista N° 1, que en términos generales se trabajó de manera más fría en casi toda su extensión, presenta valores menores.

4.1.4.2.2. Control de la Deflexión

Para evaluar la condición estructural de los pavimentos, se realizaron mediciones de deflexión mediante el Deflectómetro de Impacto (FWD), tanto en el Tramo de Prueba (mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho) como en un tramo de 200m con mezcla asfáltica tradicional (Km 0.500 al Km 0.700). Estas se llevaron a cabo el 10.10.2012, aproximadamente un mes después del término de las faenas de pavimentación del Tramo de Prueba. El modelo de FWD utilizado, pertenece al Laboratorio Nacional de Vialidad (KUAB).

La medición de deflexiones se realiza según el procedimiento descrito en 8.502.5 del M.C.-V.8, en el centro de cada pista y a intervalos uniformes de 20m, incluyendo las ubicaciones donde se extrajeron los testigos en el Tramo de Prueba. Para la caracterización de la condición estructural del pavimento, se efectúa el Retroanálisis según la metodología descrita en 8.502.6. Para el paquete estructural, de espesor total 42.5cm (considerando el total de las capas aglomeradas y las capas granulares), se calcula el Número Estructural efectivo (NEef), y para el suelo de fundación (subrasante) se calcula el Módulo Resiliente (MR).

En las siguientes figuras se presentan los resultados de estos parámetros, junto con la Deflexión máxima (bajo el punto de carga) normalizada en la superficie del pavimento (DMX).

- **Deflexiones Máximas: Pista N° 1 y Pista N° 2.**

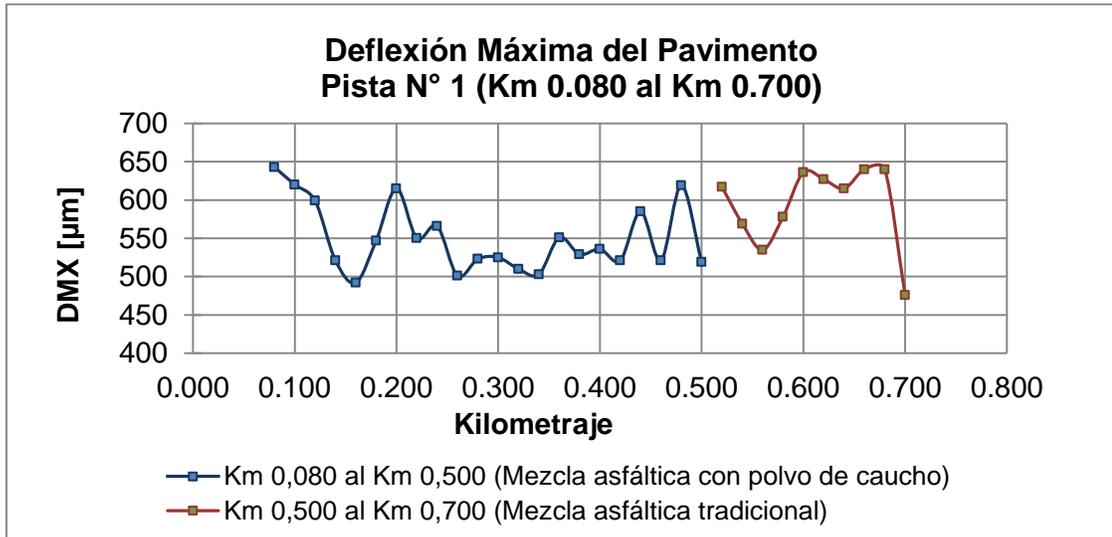


Figura 4-19. Deflexión máxima, pista N° 1 (10.10.2012).

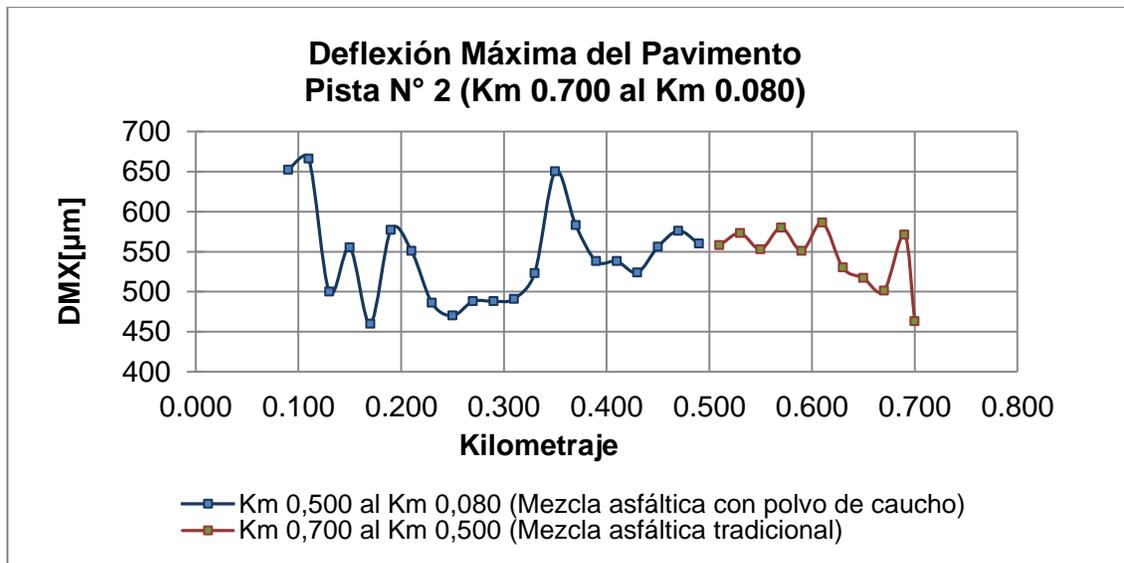


Figura 4-20. Deflexión máxima, pista N° 2 (10.10.2012).

- Módulos Resilientes de la Subrasante: Pista N° 1 y Pista N° 2.

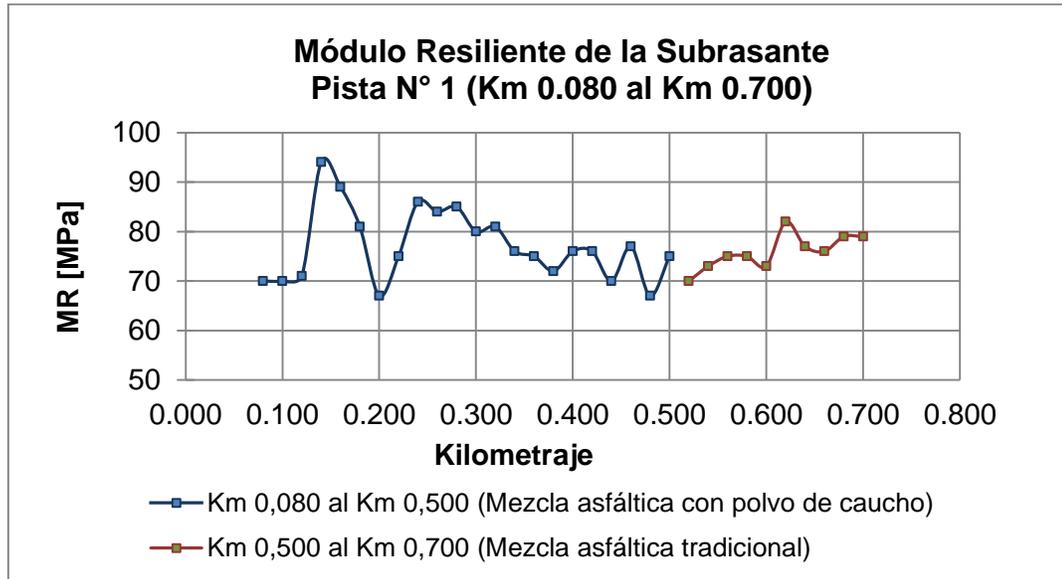


Figura 4-21. Módulo resiliente de la subrasante, pista N° 1 (10.10.2012).

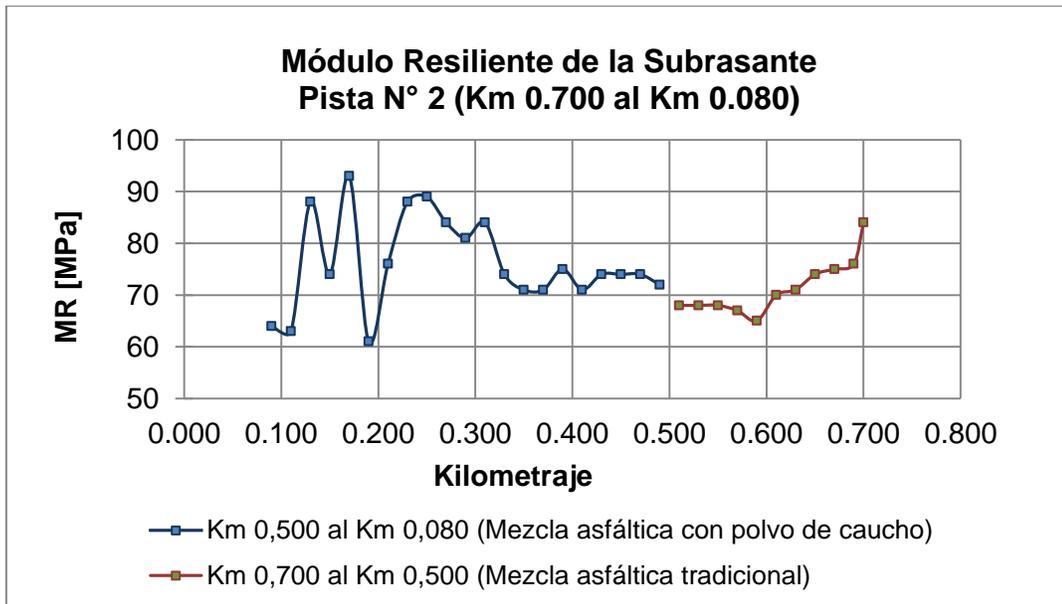


Figura 4-22. Módulo resiliente de la subrasante, pista N° 2 (10.10.2012).

- **Números Estructurales Efectivos: Pista N° 1 y Pista N° 2.**

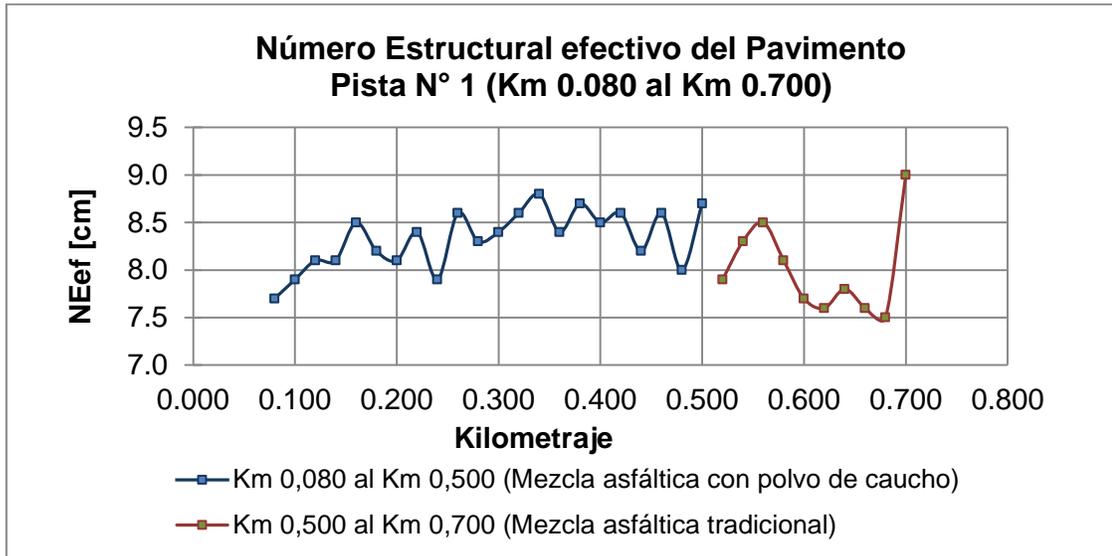


Figura 4-23. Número Estructural efectivo del pavimento, pista N° 1 (10.10.2012).

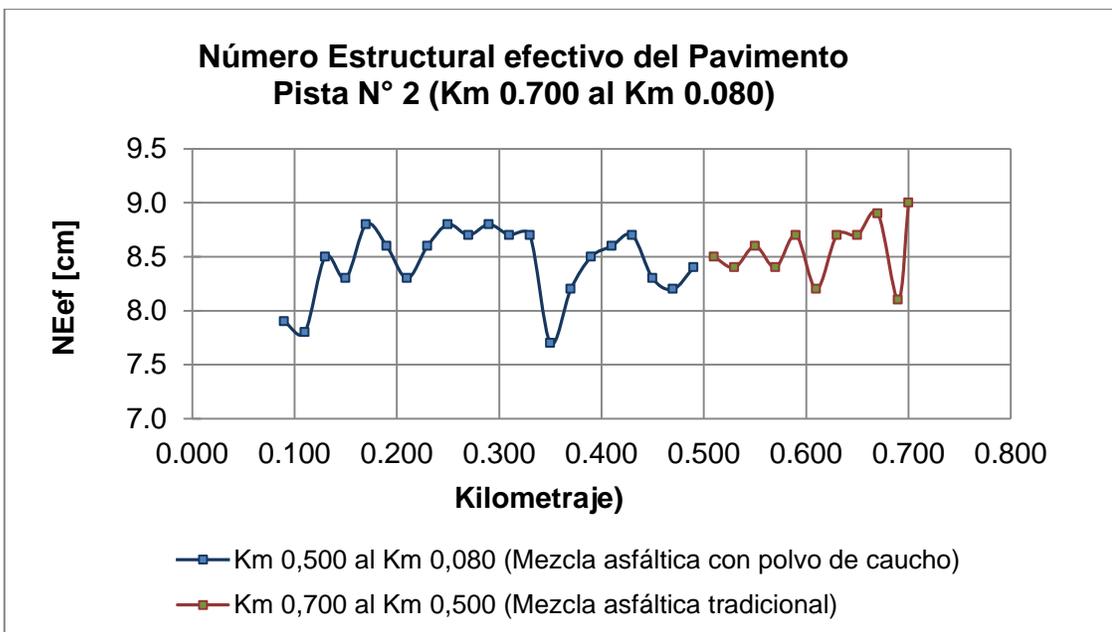


Figura 4-24. Número Estructural efectivo del pavimento, pista N° 2 (10.10.2012).

A continuación, se presentan los valores medios obtenidos de deflexión, módulo resiliente y número estructural para ambas pistas y para cada tipo de mezcla asfáltica en capa de rodadura:

Tabla 4-47. Valores promedios de la deflectometría de impacto, pista N° 1.

Pista N° 1	DMX	MR	NEef
	[μm]	[MPa]	[cm]
Km 0.080 al Km 0.500 (Mezcla asfáltica con polvo de caucho)	550	77	8.3
Km 0.500 al Km 0.700 (Mezcla asfáltica tradicional)	593	76	8.0

Tabla 4-48. Valores promedios de la deflectometría de impacto, pista N° 2.

Pista N° 2	DMX	MR	NEef
	[μm]	[MPa]	[cm]
Km 0.500 al Km 0.080 (Mezcla asfáltica con polvo de caucho)	544	76	8.4
Km 0.700 al Km 0.500 (Mezcla asfáltica tradicional)	544	71	8.6

Los valores de los módulos de subrasante en promedio determinan un suelo homogéneo a lo largo de los dos tramos y las dos pistas; se observa una leve disminución de su capacidad en la pista N° 2, en el sector con mezcla asfáltica tradicional.

Respecto a la condición estructural, se puede identificar el cambio en la capacidad estructural entre un pavimento y otro (debido al cambio en la mezcla asfáltica utilizada en la capa de rodadura), sin embargo, en términos comparativos, no es posible establecer claramente cuál de ellos presenta una mejor condición estructural. En efecto, en el Tramo de Prueba, su condición es regular en ambas pistas (NEef de 8.3cm en la pista N° 1 y 8.4cm en la N° 2), a diferencia del tramo con mezcla asfáltica convencional, donde se observan diferencias significativas entre una pista y otra, siendo la condición de la estructura inferior en la pista N° 1 (NEef de 8.0cm) en comparación a la pista N° 2 (NEef de 8.6cm).

De esta manera, entre los pavimentos de los tramos con distintas mezclas asfálticas en rodadura (igual estructuración), se obtiene que:

$$NEef_{\text{tradicional - Pista N° 1}} < NEef_{\text{Mezcla modificada polvo de caucho}} < NEef_{\text{Mezcla tradicional - Pista N° 2}}$$

Se debe tener en cuenta, que la determinación de la capacidad estructural del pavimento se realizó a partir de un modelo de la estructura, considerando los espesores de diseño de las capas granulares y asfálticas, los cuales varían con respecto a los valores reales, por lo que los resultados de la deflectometría se ven levemente alterados. En efecto, basta ver los espesores obtenidos para la capa de rodadura a partir de testigos (Tabla 4-41 y Tabla 4-42), los cuales varían en relación al espesor de proyecto (50mm) y entre un sector y otro. En el caso del Tramo de Prueba, por ejemplo, el espesor promedio de la pista N° 1 (51mm) es notoriamente inferior al de la pista N° 2

(56mm). No sucede lo mismo en el sector con mezcla asfáltica convencional (espesor promedio de 53mm en ambas pistas).

Debe señalarse que las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles, que se flexionan demasiado bajo las cargas sucesivas y en consecuencia se agrietan por fatiga antes de cumplir su periodo de vida útil.

4.1.4.2.3. Control de la Rugosidad (IRI)

En este estudio, se determina la rugosidad superficial, expresada en términos del IRI, como un indicador del estado funcional del pavimento asfáltico. Las irregularidades en la superficie de la capa de rodadura, son las causantes de las vibraciones en los vehículos que afectan el comportamiento de los neumáticos y su suspensión y afectan en consecuencia la capacidad de servicio que presta un pavimento al usuario (confort de manejo). Este indicador depende principalmente de las condiciones de colocación y compactación de la mezcla en terreno.

La determinación de la rugosidad se realiza por el método de perfilometría longitudinal descrito en 8.502.8 del M.C.-V.8. De acuerdo al procedimiento, el IRI se evalúa longitudinalmente, en forma continua, y cada pista en forma separada.

Para fines comparativos, se realizaron los controles tanto en el Tramo de Prueba (Km 0.080 al Km 0.500), como también en un sector de 500m con la mezcla asfáltica tradicional (Km 0.500 al Km 1.000). Además, con el fin de evaluar la variación del IRI en el tiempo, se realizaron dos mediciones con aproximadamente cinco meses de separación. La primera se realizó el 14.11.2012, aproximadamente dos meses después del término de las faenas de pavimentación del Tramo de Prueba, y la segunda se ejecutó el 22.04.2013, cinco meses después.

Las mediciones se llevaron a cabo mediante equipos perfilométricos laser de precisión Clase I, según el Banco Mundial. En la primera fecha, se utilizó el perfilómetro laser ARAN y en el segundo caso, el perfilómetro laser MLP, ambos pertenecientes al LNV (Subdepartamento de Auscultaciones).

En los siguientes gráficos, se entregan los resultados del IRI, correspondientes al promedio de ambas huellas, procesadas cada 20m. La Figura 4-25 corresponde a las dos mediciones realizadas en la pista N° 1 en Noviembre del 2012 y en Abril 2013, y la Figura 4-26 corresponde al IRI de la pista N° 2, para las mismas fechas.

- Pista N° 1

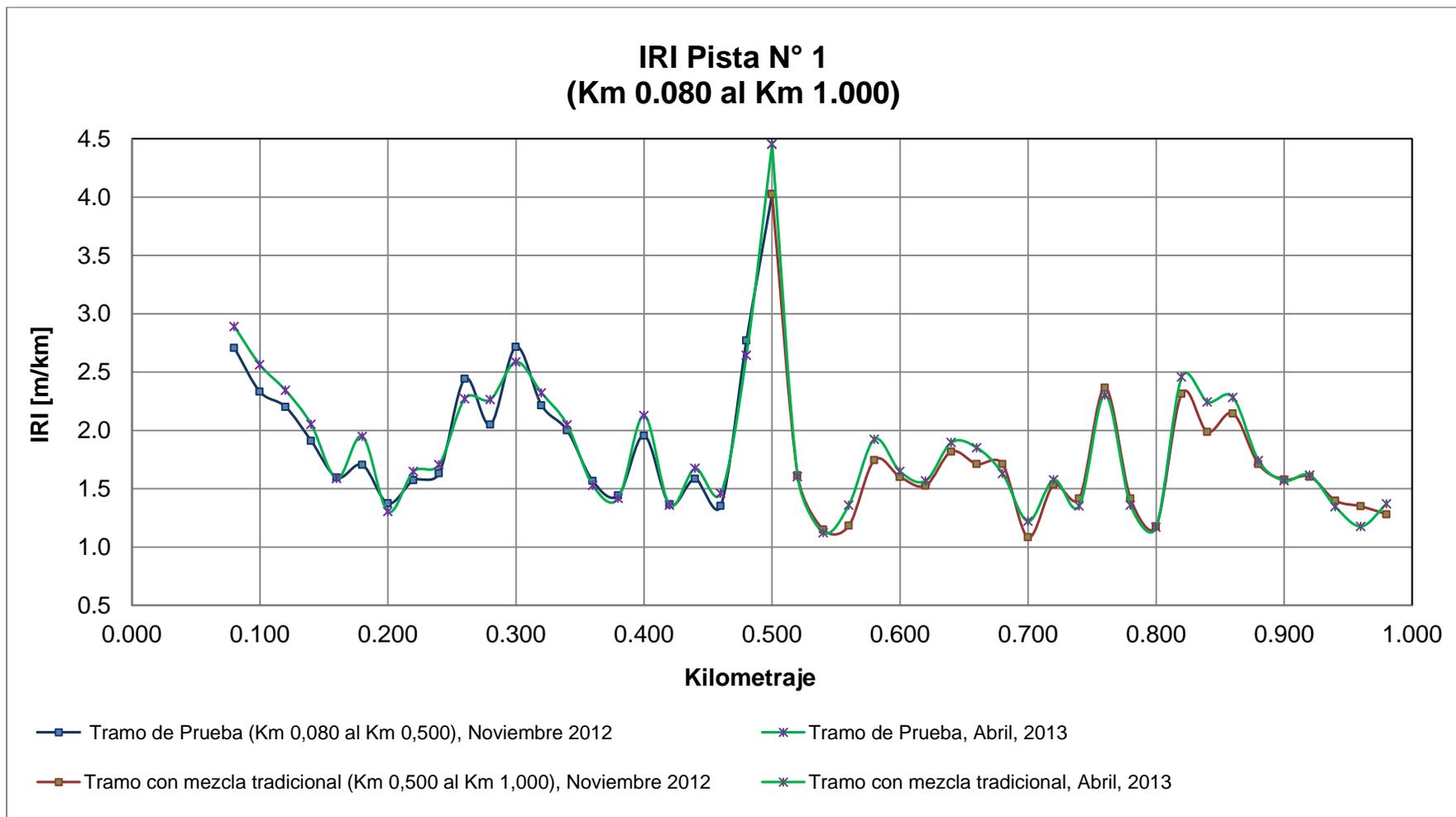


Figura 4-25. IRI, pista N° 1.

- Pista N° 2

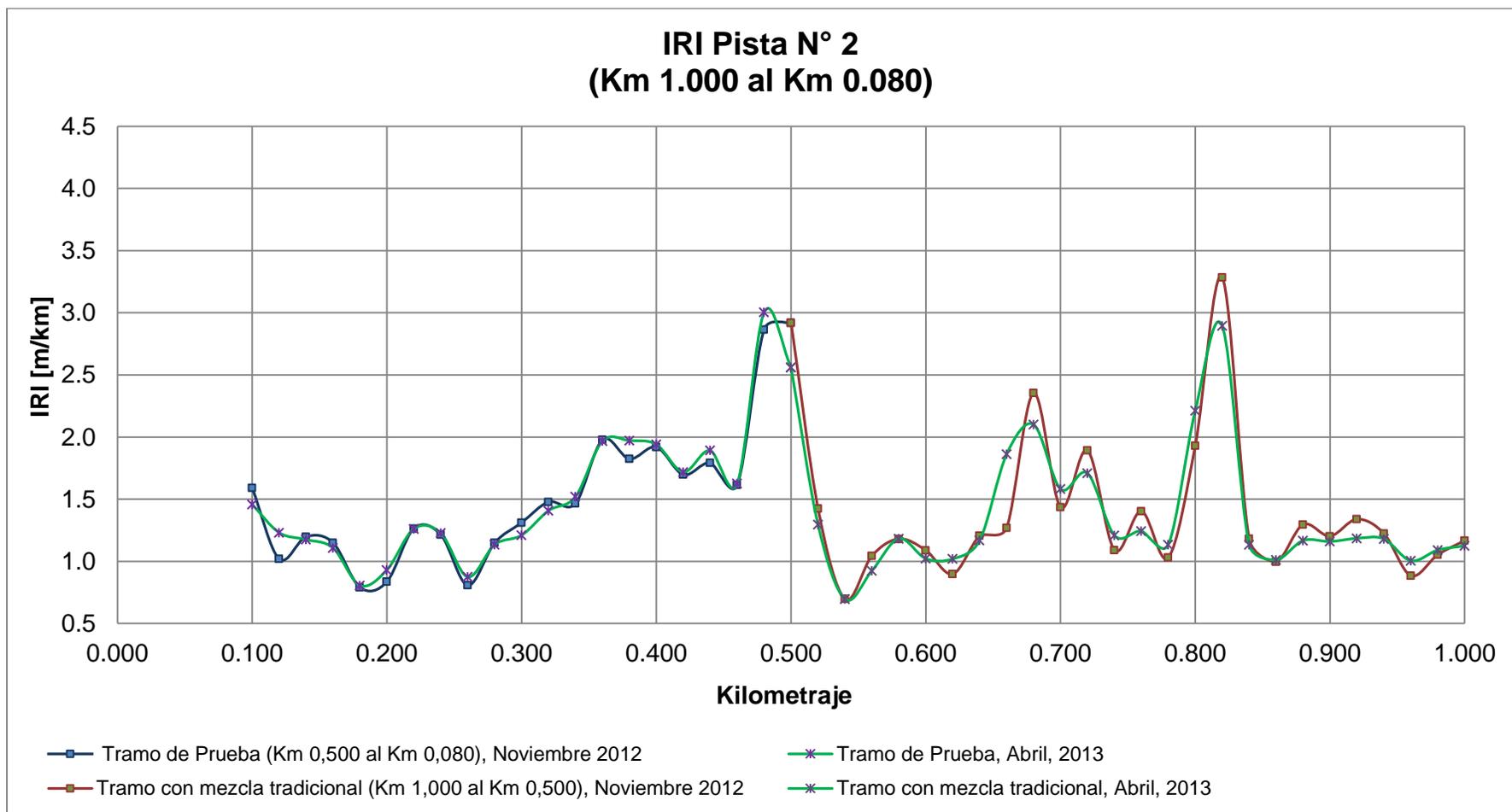


Figura 4-26. IRI, pista N°2.

De los gráficos, para ambas pistas y en cada uno de los tramos evaluados (con y sin incorporación de polvo de caucho), se observa una gran variabilidad en los valores del IRI. En general, estos fluctúan entre 0.5 y 2.8m/km, a excepción de algunos sectores específicos en donde se presentan alteraciones del perfil longitudinal muy superiores, que provienen de fallas constructivas y/o deficiencias superficiales prematuras (atribuibles a la baja temperatura de compactación, deformaciones en la superficie (ahuellamientos), entre otros), y que en consecuencia generan los problemas de megatextura (ondulaciones de longitud mayores a 50mm) y rugosidad en la superficie del pavimento.

En efecto, en el Km 0.500 se encuentran las dos juntas transversales (una por pista) que definen el cambio de mezcla asfáltica en la capa superficial del pavimento. Específicamente en la zona aledaña a la junta que queda comprendida en el Tramo de Prueba, se presentan una gran cantidad de irregularidades superficiales visibles (sector de 30 metros aproximadamente) debido al enfriamiento de la mezcla (la compactación no se ejecutó a la temperatura indicada, cuando la mezcla es trabajable). Como se observa en la Figura 4-27, es posible distinguir la terminación señalada, donde la sobrecompactación produjo, aparte de exudación, un ondulamiento en la superficie. Además, el sobre-rodillado a baja temperatura al que se sometió la mezcla asfáltica con polvo de caucho, que es muy sensible a la pérdida de temperatura, más que favorecer su densificación, generó microfisuras, que con las sollicitaciones por el tránsito vehicular y los factores medioambientales, se han transformando actualmente en una incipiente grieta transversal (prematura), observable cerca de los bordes de la calzada, donde el fenómeno de fatiga es más acusado debido a las condiciones de borde.



Figura 4-27. Agrietamiento transversal en la junta (Km 0.500, faja izquierda). Inspección superficial concreto asfáltico en capa de rodadura (29.07.2013).

Una situación similar se da en el inicio del Contrato y en particular en la pista N° 1 (Km 0.080), donde la sobrecompactación en la zona de la junta (empalme con la Ruta 68), puede ser la causa de que en esa zona se presente un incremento en el valor de este parámetro.

Otro factor a considerar que influye en el aumento de las irregularidades superficiales medidas, son las deformaciones permanentes presentes en la superficie

del pavimento (ahuellamientos). Esto es identificable en el sector con mezcla tradicional, particularmente en la pista N° 2, en el sector aledaño al Km 0.800, que como se ve más adelante (Sección 4.1.4.2.4 de este Capítulo), es una zona en que se presentaron ahuellamientos pronunciados en la fecha de medición.

Con respecto a la variación del IRI en el tiempo, no se observan cambios notorios entre la primera y la segunda medición realizada cinco meses después, signo de que en ese transcurso de tiempo no ha existido un deterioro superficial en los pavimentos evaluados; producto de baches, grietas u otros factores que podrían afectar el perfil. Solo es posible apreciar, un aumento importante en el valor del IRI de casi 1m/km en la pista N° 1, en el Km 0.500, que coincide con el sector débil de la junta transversal.

- Procedimiento de Evaluación

Según lo estipulado para el Control de rugosidad (IRI) de las mezclas asfálticas en caliente convencionales, en 5.408.304(5) del M.C.-V.5, la superficie del pavimento nuevo tiene una rugosidad aceptable, si todos los promedios de cinco tramos consecutivos (o eventualmente menos) de 200m o fracción, tienen un valor de IRI igual o inferior a 2.0m/km y ninguno de los valores individuales supera 2.8m/km. Estos requerimientos permiten asegurar un pavimento suave con buena calidad de manejo, sin signos (o muy pocos) de deterioro o defectos superficiales. La importancia del IRI va directamente relacionada con el comportamiento del pavimento en su vida útil; un pavimento con IRI inicial más bajo puede soportar muchos más vehículos que uno con mayor IRI inicial en su vida útil.

En la Tabla 4-49 y en la Tabla 4-50, se incluyen los resultados del IRI cada 200m y las medias fijas, de tres tramos consecutivos, para cada una de las pistas evaluadas, y en ambas fechas de medición.

Tabla 4-49. Control del IRI, pista N° 1.

Km	Km	Long. Tramo [km]	IRI [m/km]		IRI [m/km]		Tipo de mezcla asfáltica
			14.11.2012		22.04.2013		
			Evaluación Individual	Evaluación Media Fija	Evaluación Individual	Evaluación Media Fija	
0.080	0.200	0.120	2.1	1.9	2.2	2.0	Mezcla con polvo de caucho
0.200	0.400	0.200	1.9		1.9		
0.400	0.500	0.100	1.8		1.9		
0.500	0.600	0.100	1.9	1.7	2.1	1.8	Mezcla tradicional
0.600	0.800	0.200	1.6		1.6		
0.800	1.000	0.200	1.7		1.7		

Tabla 4-50. Control del IRI, pista N° 2.

Km	Km	Long. Tramo [km]	IRI [m/km]		IRI [m/km]		Tipo de mezcla asfáltica
			14.11.2012		22.04.2013		
			Evaluación Individual	Evaluación Media Fija	Evaluación Individual	Evaluación Media Fija	
1.000	0.800	0.200	1.4	1.3	1.3	1.3	Mezcla tradicional
0.800	0.600	0.200	1.5		1.5		
0.600	0.500	0.100	1.1		1.1		
0.500	0.400	0.100	2.2	1.6	2.2	1.6	Mezcla con polvo de caucho
0.400	0.200	0.200	1.4		1.5		
0.200	0.080	0.120	1.1		1.1		

Según los resultados del IRI, en el Tramo de Prueba se verifica la especificación, tanto por muestra individual, como por media fija, en ambas pistas, al igual que en el tramo evaluado representativo de la mezcla asfáltica tradicional en carpeta.

Sin embargo, al comparar ambos sectores, son mayores los valores del IRI en el Tramo de Prueba (valor promedio de 1.8m/km) con respecto al tramo con mezcla asfáltica tradicional (valor promedio de 1.5m/km). Esto, como ya se ha dicho, es consecuencia del mayor enfriamiento sufrido durante su colocación y compactación producto del uso de polímero en la mezcla asfáltica modificada (pérdidas de temperatura son más rápidas que en las mezclas convencionales). Esto también se reafirma, al comparar ambas pistas, donde la Pista N° 2 del Tramo de Prueba, cuya compactación se lleva a cabo a temperatura mayores que la N° 1, según el registro de temperaturas, presenta menores valores de IRI.

Al respecto, se debe tener en cuenta además, la importancia de que la extensión de la mezcla asfáltica con polvo de caucho se realice de la forma más continua y uniforme posible. En efecto, el material debe suministrarse (por los camiones) de manera que la finisher pueda trabajar sin paradas, de lo contrario el material bajo la regla se enfría muy rápidamente (más que la mezcla convencional) y se puede formar una ondulación que luego es muy difícil eliminar con los rodillos.

4.1.4.2.4. Control del Ahuellamiento

La medición de las deformaciones permanentes en la huella de los vehículos presentes en los pavimentos se realiza por el método descrito en 8.502.11 del M.C.-V.8, donde se establece que el procedimiento de evaluación del ahuellamiento se debe efectuar cada 200m lineales, por cada pista.

Las mediciones se realizaron con el Perfilómetro láser ARAN (LNV) el 14.11.2012, aproximadamente dos meses después del término de las faenas de pavimentación del Tramo de Prueba. Para fines comparativos, estas se efectuaron tanto en el Tramo de Prueba (Km 0.080 al Km 0.500), como también en un tramo de 500m con la mezcla asfáltica tradicional (Km 0.500 al Km 1.000).

En la Figura 4-28 y la Figura 4-29, se entregan los resultados del ahuellamiento cada 20m en la pista N° 1 y la pista N° 2, respectivamente.

En el Tramo de Prueba, los valores del ahuellamiento son relativamente parejos en ambas pistas, se puede observar que las deformaciones superan el milímetro, pero no sobrepasan los 6mm. Por el contrario, en el tramo con mezcla asfáltica tradicional, los resultados presentan mayor variabilidad; en la pista N° 1, las medidas no sobrepasan los 4mm de ahuellamiento, sin embargo, en la pista N° 2, los valores se incrementan; superando los 2mm y alcanzando los 12mm en ciertos sectores.

Se debe tener presente que en condiciones normales de operación las deformaciones producidas por el tránsito son despreciables, sin embargo existen factores que tienden a aumentar la tasa de deformación de la mezcla asfáltica y que eventualmente producen el incremento en los valores de ahuellamiento. Estos factores son las altas temperaturas (clima), las cargas pesadas y la circulación a bajas velocidades, que normalmente actúan en conjunto. En efecto, tanto las temperaturas altas de servicio como el tránsito lento y pesado producen un efecto equivalente en la mezcla, ya que disminuyen la rigidez del asfalto y, por lo tanto, aumentan la componente plástica de deformación del asfalto (comportamiento viscoelástico).

Esto se puede ejemplificar en la Pista N° 2, entre el Km 0.650 al Km 0.850 (mezcla asfáltica con asfalto tradicional), donde el incremento de los valores de ahuellamiento, superiores a 4mm, son atribuibles a que entre el Km 0.730 y el Km 0.810 aproximadamente, hay una calle lateral en la vereda oriente (ver singularidades en Tabla 4-28), y el sector está sometido a los constantes virajes de vehículos pesados que doblan mayoritariamente hacia el sur (Santiago). Este efecto, en los meses de primavera que transcurrieron desde la abertura al tránsito hasta la medición, se vio potenciado por las altas temperaturas de servicio. Algo similar sucede entre el Km 0.300 y el Km 0.600, donde se encuentran varios accesos a fábricas, y es habitual la entrada y salida de camiones que realizan virajes a baja velocidad.

- Pista N° 1

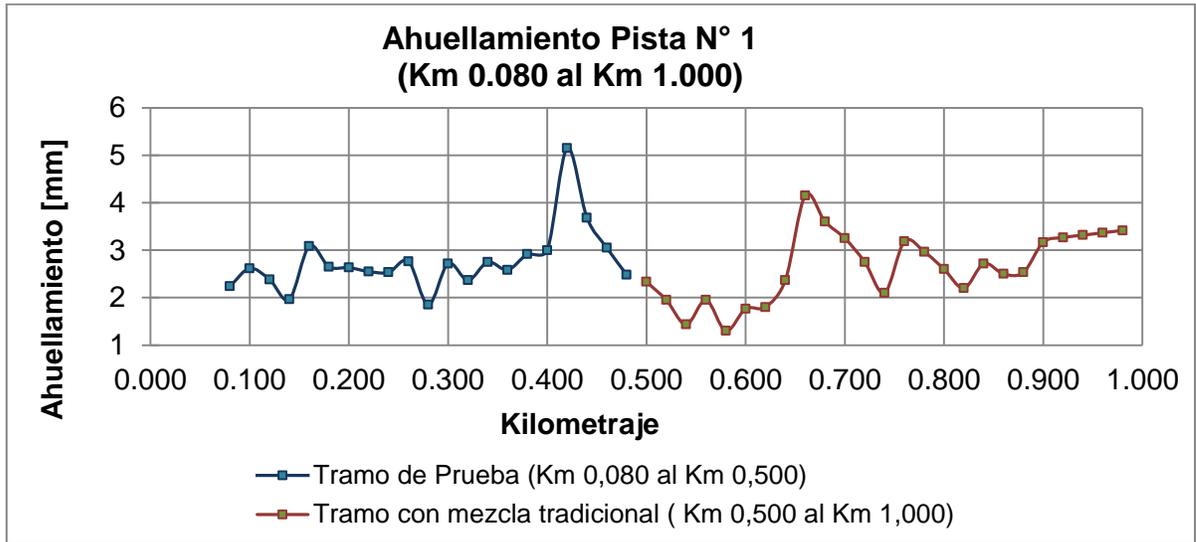


Figura 4-28. Ahuellamiento, pista N° 1 (14.11.2012).

- Pista N° 2

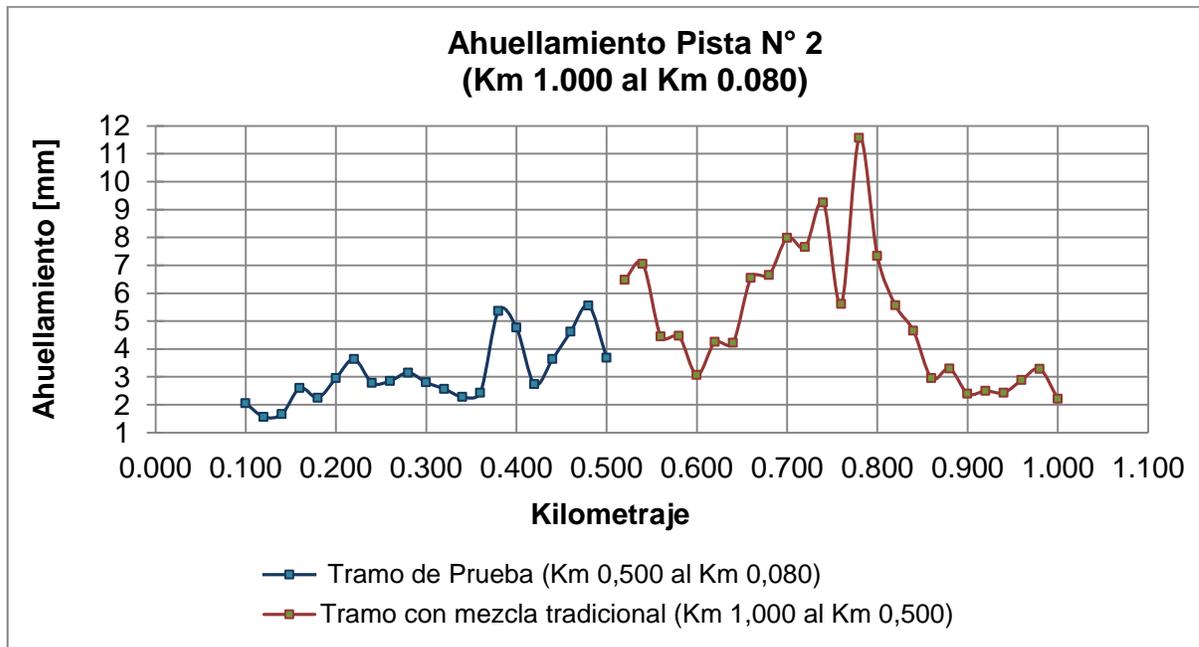


Figura 4-29. Ahuellamiento, pista N° 2 (14.11.2012).

Se debe tener en cuenta, que la presencia de ahuellamiento en el pavimento afecta tanto su condición estructural (disminución de su vida útil) como su condición funcional (condiciones de manejo y la seguridad de los usuarios), especialmente en condiciones de circulación bajo lluvia. Esto debido a que la acumulación de agua en su

depresión en niveles extremos, aumenta la probabilidad de ocurrencia de accidentes (hidroplaneo). Para este parámetro no existen especificaciones de parte del LNV (Manual de Carreteras) que indiquen umbrales máximos permitidos, sin embargo, debido a este potencial riesgo de accidente, las bases de licitación en el actual sistema de concesiones de carreteras exigen un control del ahuellamiento, cuyo valor máximo es de 15mm.

Para el procedimiento de evaluación, se calcula el ahuellamiento promedio para los subtramos de 200m de longitud (Tabla 4-51 y Tabla 4-52).

Tabla 4-51. Control del ahuellamiento, pista N° 1.

Km Inicio	Km Fin	Long. Tramo [km]	Ahuellamiento [mm]	Promedio [mm]	Tipo de mezcla asfáltica
0.080	0.200	0.120	2	3	Mezcla con polvo de caucho
0.200	0.400	0.200	3		
0.400	0.500	0.100	3		
0.500	0.600	0.100	2	3	Mezcla tradicional
0.600	0.800	0.200	3		
0.800	1.000	0.200	3		

Tabla 4-52. Control del ahuellamiento, pista N° 2.

Km Inicio	Km Fin	Long. Tramo [km]	Ahuellamiento [mm]	Promedio [mm]	Tipo de Mezcla asfáltica
1.000	0.800	0.200	3	5	Mezcla tradicional
0.800	0.600	0.200	7		
0.600	0.500	0.100	5		
0.500	0.400	0.100	4	3	Mezcla con polvo de caucho
0.400	0.200	0.200	3		
0.200	0.080	0.120	2		

Como se observa en las tablas, ninguna medida de los subtramos supera el requerimiento exigido en concesiones; las deformaciones no sobrepasaron los 4mm de ahuellamiento en el Tramo de Prueba y los 7mm en el sector con mezcla asfáltica tradicional. Los menores valores observados en el sector del Tramo de Prueba, respecto al otro sector, puede ser atribuido a la mayor viscosidad de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho a las temperaturas de servicio.

4.1.4.2.5. Control del Coeficiente de fricción transversal (SCRIM)

Una de las principales características que debe cumplir un pavimento, se refiere a disponer de una superficie que asegure una buena adherencia con los neumáticos en todo instante y especialmente en zonas de frenado y curvas cuando el pavimento se encuentra mojado, lo cual es fundamental para la seguridad de los usuarios. Un parámetro importante en la adherencia es el coeficiente de fricción, cuyas mediciones se realizaron en dos fechas; la primera, el 17.11.2012, aproximadamente dos meses después del término de la construcción del Tramo de Prueba, y la segunda, el 22.05.2013, a seis meses de la primera medición. Para fines comparativos, estas se efectuaron tanto en el Tramo de Prueba, como en un sector del Contrato con la mezcla asfáltica tradicional (Km 0.500 al Km 2.000).

Según el procedimiento de evaluación descrito en 5.408.303(3)b) del M.C.-V.5, las mediciones se deben efectuar en forma continua, en toda la longitud del camino y en cada una de las pistas. El equipo de medición para efectos receptivos es el SCRIM (LNV), que caracteriza la resistencia al deslizamiento a medianas velocidades y en las condiciones más desfavorables; con una rueda lisa y pavimento mojado (8.602.17 del M.C.-V.8). La rueda de ensayo oblicua genera una fuerza de reacción lateral que determina el Coeficiente de Fricción transversal (representativo de la situación de derrape de un vehículo en zona de curvas).

En los siguientes gráficos, se entregan los resultados de las mediciones cada 20m; la Figura 4-30 corresponde a las mediciones realizadas en la pista N° 1 y la Figura 4-31 corresponde a las de la pista N° 2.

- Pista N° 1

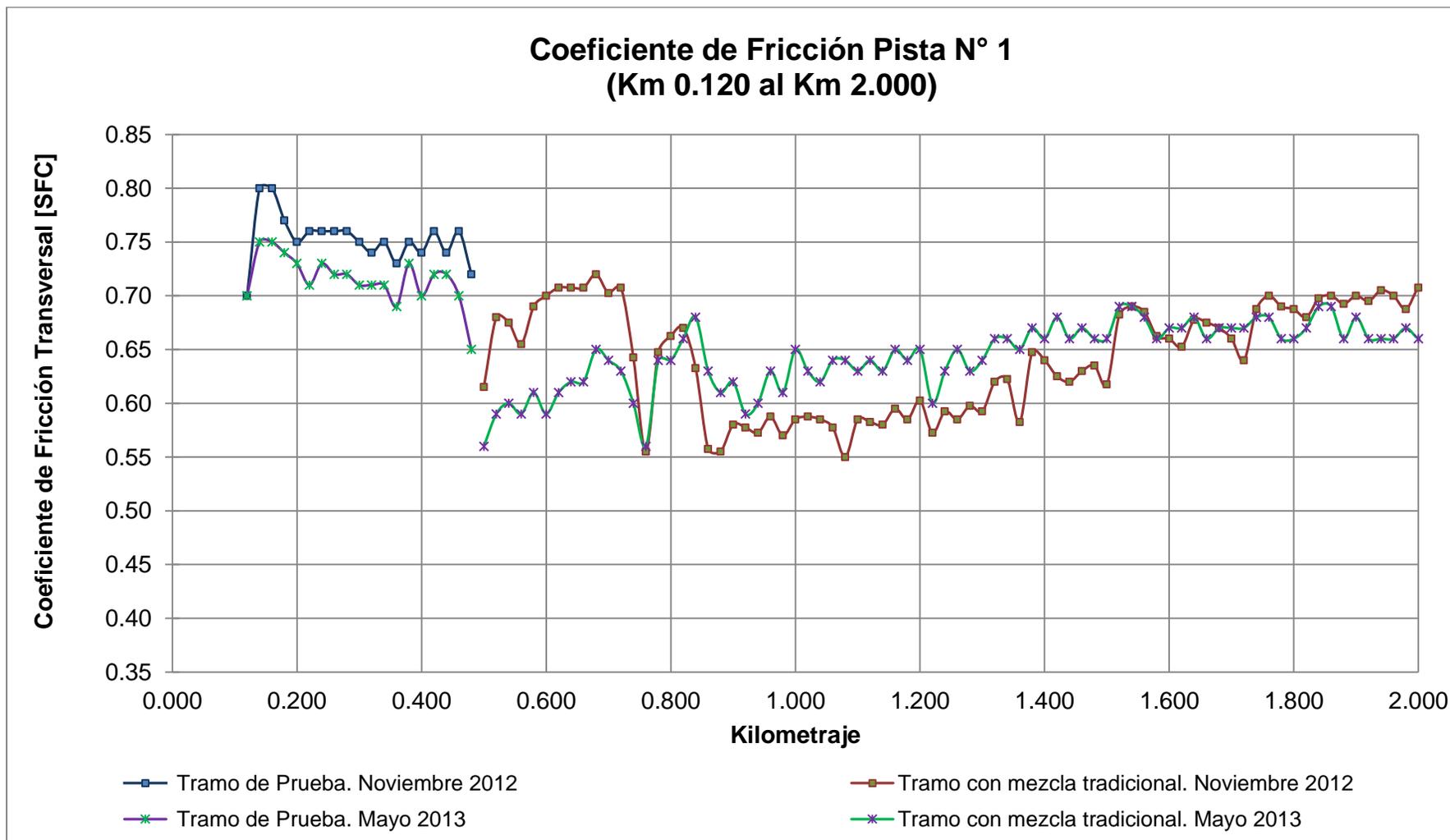


Figura 4-30. Coeficiente de fricción transversal, pista N° 1.

- Pista N° 2

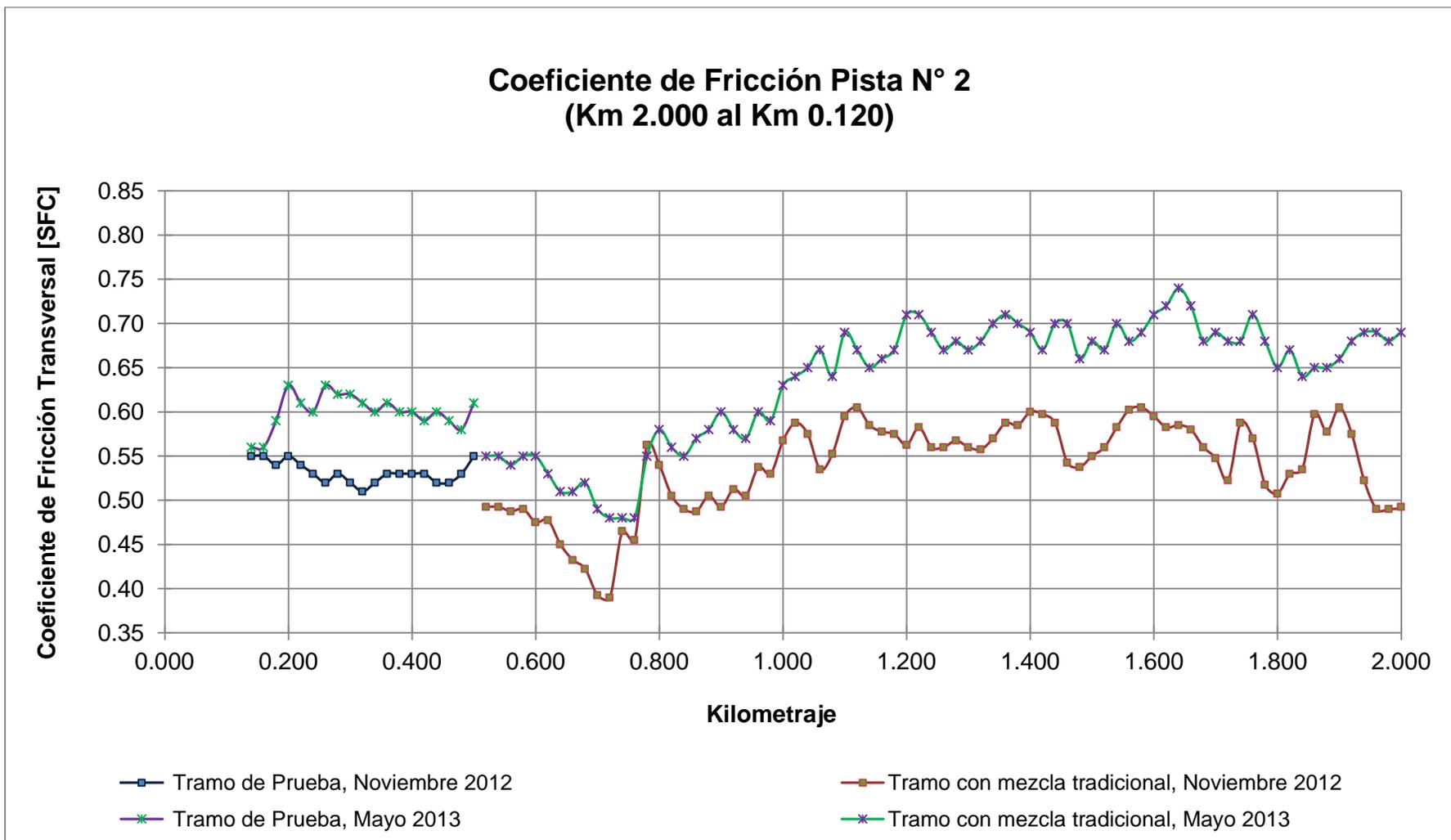


Figura 4-31. Coeficiente de fricción transversal, pista N° 2.

De los resultados obtenidos, se observan hasta el Km 0.800 aproximadamente, para ambos tipos de mezclas asfálticas, diferencias importantes y contradictorias entre una pista y otra y entre la primera y segunda fecha de medición. Por ejemplo, en el sector del Tramo de Prueba (Km 0.080 al Km 0.500), los valores del coeficiente de fricción en la pista N° 2 (0.50 a 0.65SFC) son notoriamente menores respecto a los de la pista N° 1 (rango 0.65 a 0.80SFC), y tienden a aumentar en el tiempo, entre la primera y la segunda fecha de medición, situación inversa a lo que sucede en la pista N° 1, donde los valores tienden a disminuir en el tiempo.

Estos resultados responden a que la pista N° 2 presenta habitualmente gran cantidad de polvo entre el Km 0.120 al Km 0.800, el cual es arrastrado por los autos que se estacionan a un costado de la pista, en una zona de material granular presente en toda esa longitud (ver Figura 4-32). El polvo genera una película sobre la superficie que disminuye notablemente la adherencia del neumático con el pavimento, y en consecuencia, su resistencia al deslizamiento (menores valores del coeficiente de fricción). Este hecho se reafirma al tener en cuenta que en la pista N° 2, en el tramo limpio con mezcla asfáltica tradicional (Km 0.800 al Km 2.000), las medidas de fricción, que fluctúan aproximadamente entre 0.50 a 0.75SFC, concuerdan con las registradas en la pista N° 1 (pavimento más limpio) para ese mismo tipo de mezcla (Km 0.500 al Km 2.000).



Figura 4-32. Presencia de polvo en la pista N° 2.

Por la razón señalada, solo se consideraran representativos y válidos de aquí en adelante, los valores del coeficiente de fricción obtenidos en la pista N° 1, tanto para el Tramo de Prueba como para el sector con la mezcla asfáltica tradicional, y en ellos se basa el análisis.

En términos comparativos, se observa de la Figura 4-30 (pista N° 1), que en ambas fechas las medidas de fricción del pavimento confeccionado con la mezcla asfáltica tradicional en carpeta (rango 0.55 a 0.75SFC) son menores que las del Tramo de Prueba (0.70 a 0.80SFC). De esta manera, la capa de rodadura con la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho parece proveer una superficie con mejores características de resistencia al deslizamiento en relación a una convencional, lo cual

es sumamente importante para la seguridad de los usuarios especialmente en situación de frenado y curvas y con pavimento mojado.

Con respecto a la variación de la resistencia al deslizamiento en el tiempo (pista N° 1), en el Tramo de Prueba se observa una disminución muy leve de esta propiedad en los seis meses en que se sucedieron las mediciones, sin embargo en el sector con mezcla asfáltica tradicional, el comportamiento es variado; se observa una disminución de la fricción entre el Km 0.500 al Km 0.800, y un aumento entre el Km 0.800 al Km 1.700. Se debe tener en cuenta que existen diversos factores de corto y largo plazo que inciden sobre la variabilidad de este parámetro en el tiempo, tales como el tránsito acumulado, que tiende a disminuir la fricción por el pulimiento de la superficie (distinguible a largo plazo), y la época del año en que la medición se lleve a cabo (corto plazo); ya que en invierno la fricción tiende a incrementarse debido a que las precipitaciones remueven el polvo acumulado y, por el contrario, en verano, la escasa existencia de precipitaciones hace que se forme una gruesa película de polvo en superficie que reduce notablemente la fricción entre el pavimento y los neumáticos.

En este caso en particular, la variabilidad del coeficiente de fricción en los seis meses, es principalmente atribuible a los factores de corto plazo. En efecto, en el sector entre el Km 0.800 y el Km 1.700 (pista N° 1), el incremento de la adherencia en el tiempo es consecuencia de que las mediciones fueron realizadas en distintas épocas del año; la primera en verano (escasa presencia de lluvia), y la segunda en invierno (pavimento más limpio). En cambio, entre el Km 0.120 y el Km 0.800, la mayor presencia de polvo (menor que en la pista N° 2), parece ser la causa de la disminución de la adherencia en la segunda fecha de medición, donde a pesar de ser época invernal, existían trabajos momentáneos en esa zona (que no estaban en la primera fecha) y la gran presencia de camiones arrastrando material en sus ruedas no contribuía a mantener limpio la superficie del pavimento.

Para vislumbrar mejor esta situación, se procesa la información cada 200m o fracción en cada pista (Tabla 4-53 y Tabla 4-54).

La evaluación del coeficiente de fricción se realiza según el procedimiento exclusivo para mezclas asfálticas convencionales (5.408.303(3)b) del M.C.-V.5). La normativa exige un valor mínimo de 0.4SFC que se debe cumplir a todo lo largo del camino. Se debe hacer notar que la etapa de recepción en que se deben realizar los controles a este parámetro, corresponde al período de cuatro meses después de dado el tránsito, y a partir de esa fecha, comienza la etapa de explotación de la Obra. Sin embargo, para asegurar las condiciones mínimas de seguridad en caso de derrapes en curvas, frenados de emergencia, etc. (a las velocidades de circulación del proyecto), los umbrales establecidos en la etapa de explotación deben ser los mismos que los de la etapa de recepción (Ordinario del LNV N° 04630, 20 Marzo 2003, referente a los "Criterios técnicos para pavimentos en Rutas Concesionadas").

Tabla 4-53. Control del coeficiente de fricción transversal, pista N° 1.

Km Inicio	Km Fin	Long. Tramo	Coef. Fricción 1 [SFC]	Coef. Fricción 2 [SFC]	Tipo de mezcla asfáltica
		[km]	17.11.2012	22.05.2013	
0.120	0.200	0.080	0.77	0.74	Mezcla con polvo de caucho
0.200	0.400	0.200	0.75	0.72	
0.400	0.500	0.100	0.74	0.70	
0.500	0.600	0.100	0.66	0.59	Mezcla tradicional
0.600	0.800	0.200	0.68	0.62	
0.800	1.000	0.200	0.60	0.63	
1.000	1.200	0.200	0.58	0.64	
1.200	1.400	0.200	0.60	0.64	
1.400	1.600	0.200	0.65	0.67	
1.600	1.800	0.200	0.67	0.67	
1.800	2.000	0.200	0.70	0.67	

Tabla 4-54. Control del coeficiente de fricción transversal, pista N° 2 (sector sin polvo).

Km Inicio	Km Fin	Long. Tramo	Coef. Fricción 1 [SFC]	Coef. Fricción 2 [SFC]	Tipo de mezcla asfáltica
		[km]	17.11.2012	22.05.2013	
2.000	1.800	0.200	0.54	0.67	Mezcla tradicional
1.800	1.600	0.200	0.56	0.70	
1.600	1.400	0.200	0.58	0.69	
1.400	1.200	0.200	0.57	0.69	
1.200	1.000	0.200	0.58	0.67	
1.000	0.800	0.200	0.51	0.58	

Los valores obtenidos en el Tramo de Prueba, en cada pista (incluso en la pista con polvo) y en ambas fechas, cumplen el mínimo exigido de 0.4SFC, al igual que en tramo convencional. En particular, en la pista N° 1 y en la primera fecha de medición, que es el tramo más representativo de la mezcla asfáltica modificada por vía seca (menor cantidad de polvo), se cumple la especificación, con un valor promedio de 0.75SFC (Tabla 4-53). Por otro lado, para el tramo con la mezcla asfáltica tradicional en la segunda fecha (invierno), se cumple la especificación, con un valor promedio de 0.64SFC en la pista N° 1 y de 0.67SFC en el sector limpio de la pista N° 2 (Km 2.000 al Km 0.800).

Se podrían haber obtenido medidas más representativas del coeficiente de fricción de haber realizado las mediciones después de un día de lluvia, cuyo efecto es limpiar el pavimento, pero fue imposible concordar las fechas de medición.

4.1.4.2.6. Control de la Macrotextura por ensaye del círculo de arena

La medición de la macrotextura superficial con el método del círculo de arena sólo se efectúa en el Tramo de Prueba, según lo descrito en 8.602.25 del M.C.-V.8, a aproximadamente dos meses después de dado al tránsito (20.11.2012). Las mediciones se realizan en cada pista, a intervalos de 100m.

Para el ensayo se extiende un volumen de arena fina de 25cc, en la huella externa de la pista (a aproximadamente 70cm del borde de esta), se mide el área cubierta por esta y se calcula la profundidad media de los huecos rellenos por ella, valor que se utiliza como medida de la Macrotextura superficial del pavimento (MTD). Los resultados obtenidos con el equipo perteneciente al LNV son los siguientes:

- **Pista N° 1**

Tabla 4-55. Control de la macrotextura (método del círculo de arena) en el Tramo de Prueba, pista N° 1.

Km	Huella	MTD [mm]	Tipo de mezcla asfáltica
0.100	Externa	0.5	Mezcla con polvo de caucho
0.200	Externa	0.4	
0.300	Externa	0.5	
0.400	Externa	0.5	

- **Pista N° 2**

Tabla 4-56. Control de la macrotextura (método del círculo de arena) en el Tramo de Prueba, pista N° 2.

Km	Huella	MTD [mm]	Tipo de mezcla asfáltica
0.450	Externa	0.6	Mezcla con polvo de caucho
0.350	Externa	0.6	
0.250	Externa	0.6	
0.150	Externa	0.7	

La evaluación de la macrotextura superficial se realiza según el procedimiento exclusivo para mezclas asfálticas convencionales, descrito en 5.408.303(3)a) del M.C.-V.5. La normativa exige cuatro mediciones por kilómetro, pero dado que se trata de un tramo experimental de solo 500m, estas se realizan de manera menos espaciadas, en que cada medida es representativa de un subtramo de 100m.

El rol de la macrotextura en un pavimento es permitir la evacuación rápida del agua que se deposita sobre la superficie, así que mientras mayor es su valor, mejor es la adherencia entre el neumático y el pavimento. Esta característica es especialmente importante para la circulación segura de los vehículos en condiciones de superficie mojada (a la velocidad de circulación de Proyecto), y es la razón principal por la que este parámetro se debe limitar.

El requisito de macrotextura superficial en la normativa nacional es de mínimo 0.6mm en la etapa de recepción (dentro de un plazo de cuatro meses), sin embargo se deben tener las mismas consideraciones para la etapa de explotación (por condicionar la resistencia al deslizamiento).

En la pista N° 1 (Tabla 4-55), los valores de macrotextura obtenidos no logran cumplir el mínimo exigido, lo que es atribuible a la baja temperatura a la que se realiza la compactación, que no permite lograr un acabado adecuado en la superficie. Por el contrario, la pista N° 2 presenta resultados mejores (más altos) y, como se puede observar en la Tabla 4-56, se verifica la especificación en todos los puntos evaluados.

Dado que la compactación es más adecuada en la pista N° 2, las profundidades de textura obtenidas en ella son más representativas del pavimento con la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho en carpeta, y caracterizan la superficie de rodado con un valor promedio de macrotextura de 0.6mm.

Según la clasificación a nivel internacional, los valores de mancha de arena reflejan una textura superficial media en ambas pistas (caracterizada por valores de profundidad entre 0.4 y 0.8mm), la cual permite velocidades de circulación en condiciones seguras entre 80 y 120km/h.

4.1.4.2.7. Control de la Macrotextura con método perfilométrico

Para efectos comparativos, también se efectúa la medición de la macrotextura mediante perfilometría láser, según lo descrito en 8.602.27 del M.C.-V.8, tanto en el Tramo de Prueba (Km 0.080 al Km 0.500) como en un tramo de 500m con la mezcla asfáltica tradicional (Km 0.500 al Km 1.000). Esta se realiza aproximadamente dos meses después del término de las faenas de pavimentación del tramo experimental

(14.11.2012). Para la medición de la profundidad media de la macrotextura del perfil (MPD) en las superficies auscultadas, se utiliza el Perfilómetro Laser ARAN (LNV).

En la Figura 4-33 y la Figura 4-34, se entregan los resultados de las mediciones cada 20m por pista.

- **Pista N° 1**

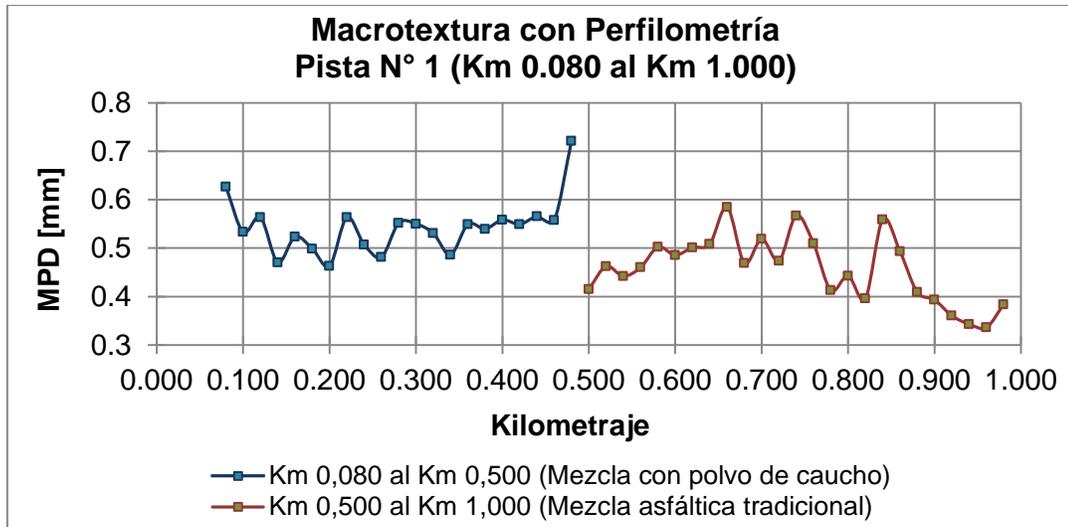


Figura 4-33. Macrotextura con método perfilométrico, pista N° 1 (14.11.2012).

- **Pista N° 2**

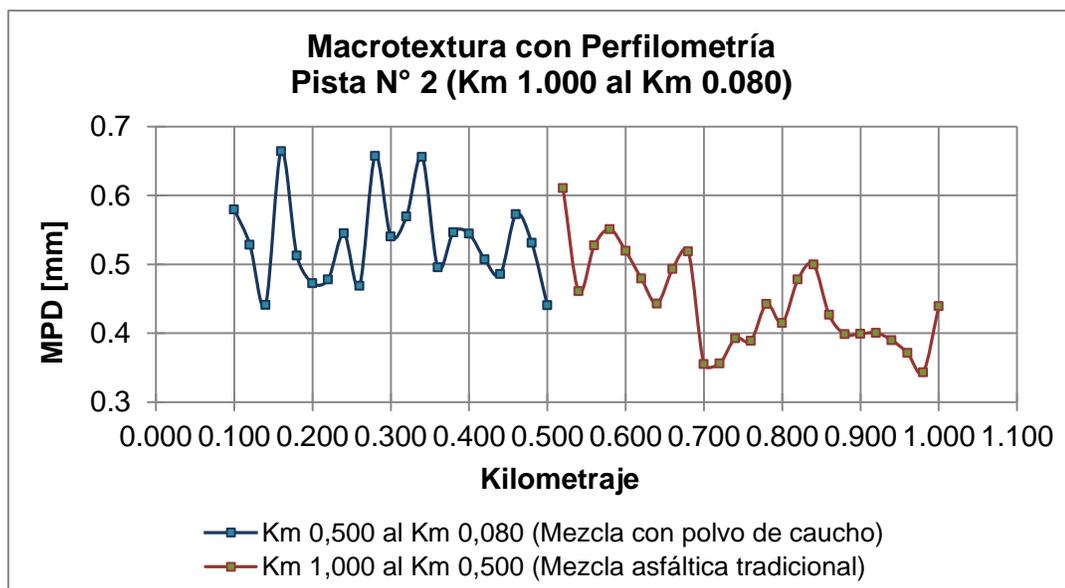


Figura 4-34. Macrotextura con método perfilométrico, pista N° 2 (14.11.2012).

De los gráficos anteriores, los valores de macrotextura obtenidos en el Tramo de Prueba son similares en ambas pistas, y están dentro del rango 0.4 a 0.7mm. Estos resultados son superiores a los del tramo con mezcla asfáltica tradicional, cuyos valores fluctúan entre 0.3 a 0.6mm en ambas pistas.

Para la macrotextura no existen normas o especificaciones de parte del LNV que indiquen cual es la metodología de análisis a seguir con los resultados obtenidos por perfilometría láser. En general, las mediciones con perfilómetro deben correlacionarse con ensayos de mancha de arena, para así poder aplicar las exigencias respectivas a estos. A modo de referencia, se puede decir que, de acuerdo al Ordinario N° 04630 del LNV, referente a los “Criterios técnicos para pavimentos en Rutas Concesionadas”, el umbral mínimo recomendado de macrotextura para la etapa de explotación, es de 0.35mm en todo momento.

Para efectuar el control receptivo según el Manual de Carreteras (8.602.27 del M.C.-V.8), se debe procesar la información determinada cada 200m o fracción de término. En la Tabla 4-57 y la Tabla 4-58 se adjuntan los valores obtenidos de la macrotextura, expresada en términos de MPD.

Los valores promedios obtenidos en el Tramo de Prueba, son levemente superiores al del tramo con la mezcla asfáltica tradicional, como ya se había identificado en los gráficos (cada 20m).

En el Tramo de Prueba, los resultados cada 200m son similares en ambas pistas, a diferencia de lo obtenido por el ensayo del círculo de arena, donde los resultados obtenidos de macrotextura (cada 100m) eran superiores en la pista N° 2. En general, los valores de MPD y MTD difieren debido al tamaño máximo de la arena usada en la técnica volumétrica y porque el MPD se deriva de un perfil de dos dimensiones, en lugar de una superficie tridimensional.

Tabla 4-57. Control de la macrotextura con método perfilométrico, pista N° 1.

Km Inicio	Km Fin	Long. Tramo [km]	MPD [mm]	Tipo de mezcla asfáltica
0.080	0.200	0.120	0.5	Mezcla con polvo de caucho
0.200	0.400	0.200	0.5	
0.400	0.500	0.100	0.6	
0.500	0.600	0.100	0.5	Mezcla tradicional
0.600	0.800	0.200	0.5	
0.800	1.000	0.200	0.4	

Tabla 4-58. Control de la macrotextura con método perfilométrico, pista N° 2.

Km Inicio	Km Fin	Long. Tramo [km]	MTD [mm]	Tipo de mezcla asfáltica
1.000	0.800	0.200	0.4	Mezcla tradicional
0.800	0.600	0.200	0.4	
0.600	0.500	0.100	0.5	
0.500	0.400	0.100	0.5	Mezcla con polvo de caucho
0.400	0.200	0.200	0.6	
0.200	0.080	0.120	0.5	

4.1.5. Resumen

En relación a las especificaciones nacionales para mezclas asfálticas en caliente convencionales, descritas en la Sección 5.408 del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras, se obtuvo los siguientes resultados en el Tramo de Prueba (se consideró solo pista N° 2, que por su mayor temperatura de compactación presenta valores más representativos de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho por vía seca):

Tabla 4-59. Resultados de los controles receptivos en el Tramo de Prueba, Contrato Mejoramiento Ruta G-184.

Control Receptivo			Especificación M.C. – V. 5		Tramo de Prueba	
Condición	Estructural	Contenido de asfalto	5.408.304 (3)	Pb ± 0.3%	Se verifica con el factor de corrección por agregado	
		Espesor	5.408.304 (2)	≥ e _c	Cumple	
		Compactación	5.408.304 (1)	≥ 97%	Cumple en promedio (área representativa de 425m)	
	Funcional	Rugosidad (IRI)	Individual	5.408.304 (5)	2.8	Cumple
			Media fija		2.0	Cumple
		Resistencia al Deslizamiento	SCRIM	5.408.303 (3) b)	≥ 0.4SFC	Cumple
Macrotextura	Círculo de Arena	5.408.303 (3) a)	≥ 0.6mm	Cumple		

4.2. Tramo de Prueba II (Ruta F – 50, Km 19.300 - Km 19.800)

El segundo Tramo de Prueba de 500m de longitud, se extiende desde el Km 19.300 al Km 19.800 en el Contrato “**Mejoramiento Ruta F-50, Lo Orozco- Quilpué, Km 17.578 al Km 29.498, Región de Valparaíso**”, cuya longitud total es de 11.920km.

- **Características principales del Proyecto**

El camino tiene una calzada de 7m con dos pistas bidireccionales. El ancho de bermas y pistas se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 4-60. Ancho de pistas y bermas en sectores con pavimento asfáltico.

Faja	N° de Pista	Ancho de Pista	Ancho de Berma
Derecha	1	3.5m	1.5m
Izquierda	2	3.5m	1.5m

El pavimento en el Contrato mayoritariamente (Km 17.578 al Km 19.300 y Km 20.800 al Km 29.498), corresponde a una carpeta con una mezcla asfáltica con asfalto tradicional de 5cm de espesor, dispuesta sobre un binder de 9.0cm de espesor, también con mezcla asfáltica tradicional, y una base granular de 29cm de espesor.

La configuración del pavimento en el Tramo de Prueba (Km 19.300 al Km 19.800), es la misma solo cambia el material de la carpeta a una mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho incorporado mediante el proceso por vía seca.

El proyecto dentro de su extensión total, contempla la construcción de otros dos tramos de prueba, por parte de la Dirección de Vialidad, utilizando nuevas tecnologías. El primer tramo, de 500m de longitud, se confecciona con una mezcla asfáltica con adición de RAP (Pavimento asfáltico recuperado) en la capa de rodadura de 5cm de espesor, sobre el mismo binder y capa granular del resto del Contrato. El otro tramo en estudio, también de 500m de longitud, se diseña con un método mecanicista, logrando disminuir el espesor del binder a 8cm y el de la base granular a 18cm (se ocupan los mismos materiales en carpeta, binder y base utilizados en el resto del Contrato). Las distintas configuraciones de pavimentos se detallan a continuación:

Tabla 4-61. Estructura del pavimento asfáltico colocado.

Km	Km	Tipo de Pavimento (CA)	Espesor [cm]		
			Capa de rodadura	Binder	Base granular (CBR ≥ 80%)
17.578	19.300	Convencional	5	9	29
19.300	19.800	Mezcla asfáltica modificada con polvo caucho en carpeta	5	9	29
19.800	20.300	Diseño Mecanicista	5	8	18
20.300	20.800	RAP en carpeta	5	9	29
20.800	29.498	Convencional	5	9	29

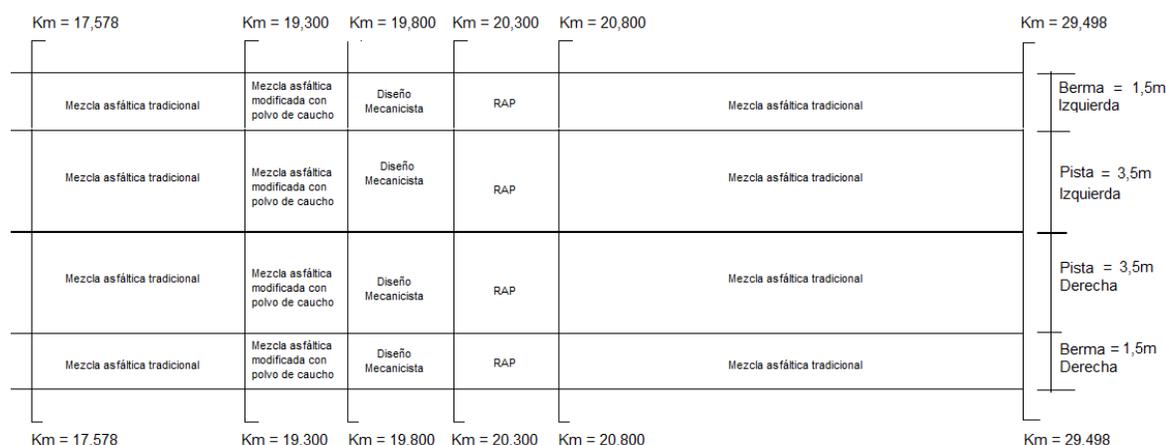


Figura 4-35. Disposición de los Tramos de Prueba en el Contrato (Km 17.578 al Km 29.498).

4.2.1. Mezcla asfáltica tradicional

La mezcla asfáltica convencional presentada por el Contratista para la capa de rodadura del Contrato (Km 17.578 al Km 19.300 y desde Km 20.300 al Km 20.800) corresponde a una mezcla para tránsito pesado de tipo semidensa, con banda granulométrica IV A 12 y tamaño máximo de árido 3/4" (20mm).

La dosificación y la fórmula de trabajo se resumen a continuación:

4.2.1.1. Dosificación de diseño y Fórmula de trabajo

En la mezcla asfáltica se emplean tres tipos de áridos: Gravilla 3/4", Polvo Roca 3/8" y Polvo Roca 5mm, cuyas proporciones en peso son las siguientes:

Tabla 4-62. Dosificación de áridos.

Tipo de material	Gravilla 3/4"	Polvo Roca 3/8"	Polvo Roca 5mm
Dosificación en peso	32%	53%	15%

La granulometría de los agregados y la banda de trabajo según el Contratista se muestran a continuación.

Tabla 4-63. Granulometría de diseño y banda de trabajo del Contratista.

Tamiz ASTM	Gravilla 3/4"	Polvo Roca 3/8"	Polvo Roca 5mm	Mezcla Áridos	Banda de Trabajo	
	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	
3/4"	100	100	100	100	100	100
1/2"	48	100	100	83	78	88
3/8"	18	100	100	74	69	79
N° 4	4	68	100	52	47	57
N° 8	3	43	69	34	30	38
N° 16	1.9	25	46	21	17	25
N° 30	0	18	32	14	11	17
N° 50	0	12	22	10	7	13
N° 100	0	9	18	7	5	9
N° 200	0	7.7	14	6.2	4.7	7.7

La fórmula de trabajo se muestra en la tabla siguiente. La dosificación óptima de asfalto se expresa en porcentaje respecto al peso del agregado (% r.a.).

Tabla 4-64. Fórmula de trabajo del Contratista.

Contenido Óptimo de Asfalto	% r.a.	5.1 ± 0.3
Temperatura de Mezclado	°C	160
Temperatura de Compactación	°C	145
Densidad Marshall	kg/m ³	2362

4.2.1.2. Caracterización y Control de calidad de materiales componentes

Previo a la incorporación de polvo de caucho a la mezcla asfáltica convencional, se procede a analizar sus materiales componentes y a visar la dosificación de la mezcla en Laboratorio, según la fórmula de trabajo presentada por el Contratista. La mezcla

asfáltica y sus componentes deben cumplir con las exigencias establecidas en 5.408.2 del M.C.-V.5.

4.2.1.2.1. Agregados pétreos

A los áridos se les realizan los siguientes ensayos para su caracterización y control:

- Granulometría de los áridos y la mezcla de áridos (Tabla 4-65).
- Determinación de densidad real seca, densidad neta y absorción de los áridos (Tabla 4-66).
- Cubicidad de partículas y determinación de la resistencia al desgaste de Los Ángeles (Tabla 4-67).

De los resultados obtenidos, la combinación de áridos (Figura 4-36) cumple la banda especificada en el Proyecto, correspondiente a la Semidensa IV-A-12 (Tabla 5.408.201.F del M.C-V.5), y se verifica el cumplimiento de las especificaciones relativas a la forma y desgaste del árido para capa de rodadura.

Tabla 4-65. Granulometría de áridos y banda especificada en el Proyecto.

Tamiz		Gravilla 3/4"	Polvo Roca 3/8"	Polvo Roca 5mm	Mezcla Laboratorio	Banda IV-A-12 (M.C.-V.5)	
		32%	53%	15%		% Pasa	
ASTM	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	
3/4"	20	100			100	100	100
1/2"	12.5	47			83	80	95
3/8"	10	24	100	100	76	70	85
N° 4	5	6	73	95	55	43	58
N° 8	2.5	3	46	63	35	28	42
N° 16	1.25		29	43	22	-	-
N° 30	0.63		20	31	15	13	24
N° 50	0.315		13	22	10	8	17
N° 100	0.16		10	16	8	6	12
N° 200	0.08		7	13	6	4	8

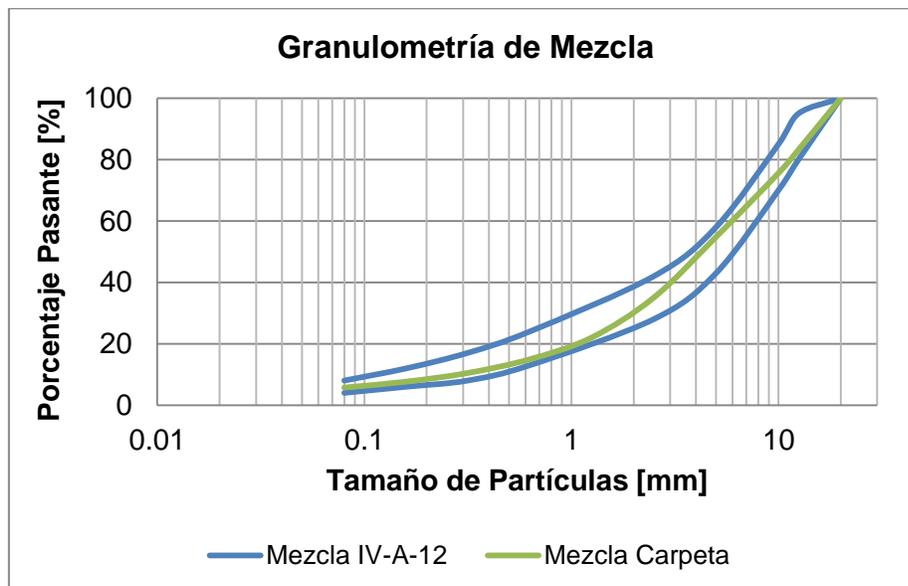


Figura 4-36. Granulometría de áridos y banda especificada en el Proyecto.

Tabla 4-66. Densidad y absorción de áridos.

Ensayos	Unidad	Gravilla 3/4"	Polvo Roca 3/8"	Polvo Roca 5 mm
Densidad Real Seca	kg/m ³	2657	2629	2697
Densidad Neta	kg/m ³	2776	2780	2781
Absorción	%	1.6	2.1	1.1

Tabla 4-67. Forma y desgaste de la mezcla de áridos.

Análisis de los Agregados de la Mezcla	Unidad	Visación	Control Calidad
Chancado	%	95	Mín. 90
Lajas	%	3	Máx. 10
Desgaste de Los Ángeles	%	13	Máx. 25

4.2.1.2.2. Cemento asfáltico

El cemento asfáltico del tipo CA-24 es el mismo utilizado en el primer Tramo de Prueba, cuya caracterización y control de calidad se encuentran descritos en la Sección 4.1.1.2.2 de este Capítulo.

4.2.1.2.3. Visación de la mezcla asfáltica tradicional

Con la fórmula de trabajo presentada por el Contratista, se reproduce la mezcla en Laboratorio con el fin de corroborar la dosificación de diseño propuesta. De esta

manera, se confeccionan tres probetas del tipo Marshall con el contenido de asfalto óptimo, la granulometría de diseño y a las temperaturas de mezclado y compactación informadas (Método 8.302.40 del M.C.-V.8). A partir de estas, se caracteriza la mezcla asfáltica según las propiedades Marshall (Método 8.302.47 del M.C.-V.8).

Tabla 4-68. Análisis Marshall y control de calidad, mezcla asfáltica tradicional.

Análisis Marshall	Unidad	Visación	Control Calidad
Contenido Óptimo de Asfalto	%	5.1	
Densidad del Asfalto	kg/m ³	1030	
Densidad Máxima de la Mezcla	kg/m ³	2491	
Densidad Marshall	kg/m ³	2371	Densidad de diseño ± 20kg/m ³
Estabilidad	N	11055	> 9000
Fluidez	0.25mm	16	8 - 16
Huecos en la Mezcla	%	4.8	4 - 6
Vacíos en el Agregado Mineral	%	14.8	> 14

Como se ve en la Tabla 4-68, se cumplen las especificaciones del Manual de Carreteras (Tabla 5.408.203.A y B del M.C.-V.5). De esta manera, la fórmula de trabajo se verifica, y la mezcla asfáltica tradicional puede ser modificada.

4.2.2. Diseño de la mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho por vía seca.

4.2.2.1. Polvo de caucho

El polvo de caucho a utilizar es el mismo que el del primer Tramo de Prueba (origen nacional). Su granulometría obtenida en Laboratorio se muestra en la Tabla 4-69 y, como se observa en la Figura 4-37, cumple la banda granulométrica especificada P-2 (NCh 3258-2012).

Tabla 4-69. Granulometría del polvo de caucho y banda especificada P-2.

Tamiz		Polvo de Caucho	P - 2	
ASTM	mm	% que pasa	% que pasa	
N° 16	1.25	100	100	100
N° 30	0.63	68	40	100
N° 50	0.315	26	10	70
N° 100	0.160	6	2	40
N° 200	0.080	2	0	20

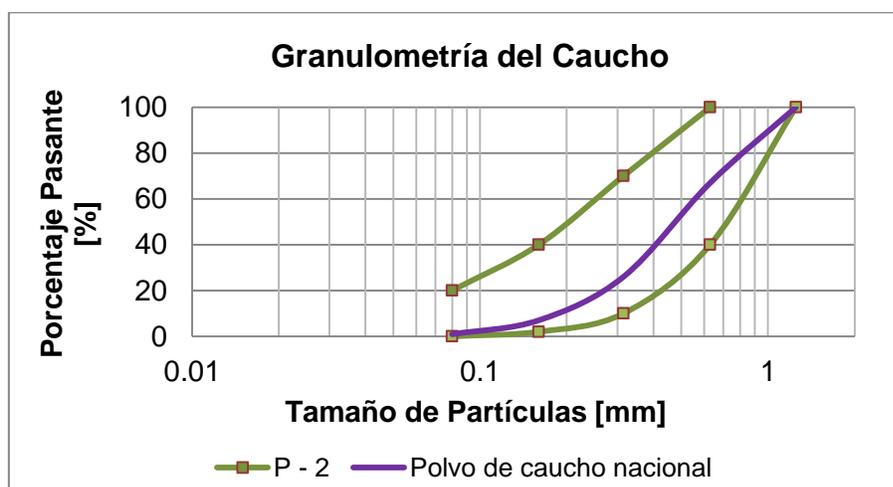


Figura 4-37. Granulometría del polvo de caucho y banda especificada P-2.

4.2.2.2. Determinación de las condiciones de digestión

De igual manera que para el primer Tramo de Prueba, se deben determinar el tiempo y la temperatura de digestión para realizar la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho, exigiendo un mínimo de Resistencia Conservada. Este parámetro se obtiene a través del ensayo de Sensibilidad al agua (UNE-EN 12969-12 y UNE-EN 12969-23), donde la especificación española exige un mínimo de 85% (Orden Circular 24/2008: PG-3, Artículo 542).

Previo a la realización del ensayo, se procede la confección de las mezclas asfálticas modificadas. Para tal efecto, se define el porcentaje de incorporación del polvo de caucho en 0.5% respecto al peso del agregado. Se realizan 4 series de seis probetas Marshall (compactadas con 50 golpes por cara) con distintas dosificaciones de asfalto, de 5.1% (porcentaje óptimo de la mezcla asfáltica tradicional), 5.3%, 5.4% y 5.5% (porcentajes referidos al peso del agregado). Cada grupo se somete a las mismas condiciones de digestión, de 2 horas y 170°C. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 4-70. Variación de la Resistencia Conservada por tracción indirecta con el contenido de asfalto.

Contenido de Asfalto	Contenido de Caucho	Digestión		ITS [MPa]		ITSR [%]
		Temperatura	Tiempo	Probetas en Seco	Probetas Sumergidas	
5.1%	0.5%	170°C	2 hrs	1.67	1.25	75
5.3%	0.5%	170°C	2 hrs	1.74	1.64	94
5.4%	0.5%	170°C	2 hrs	1.71	1.68	98
5.5%	0.5%	170°C	2 hrs	1.95	1.92	98

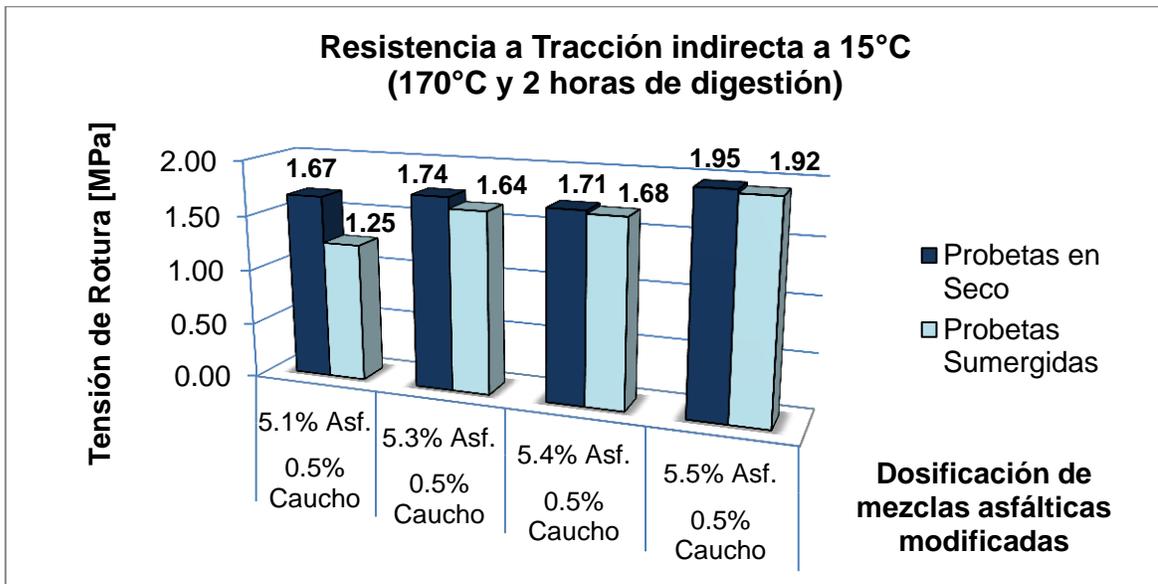


Figura 4-38. Variación de la resistencia a tracción indirecta con el contenido de asfalto.

En la Figura 4-38, se observa un incremento en los valores de la resistencia a tracción indirecta a medida que aumenta el contenido de asfalto. Este incremento es mayor en las probetas sometidas a condiciones húmedas que en las sometidas a condiciones secas, y genera el consecuente aumento de la resistencia conservada con el contenido de asfalto, como se observa en la Figura 4-39.

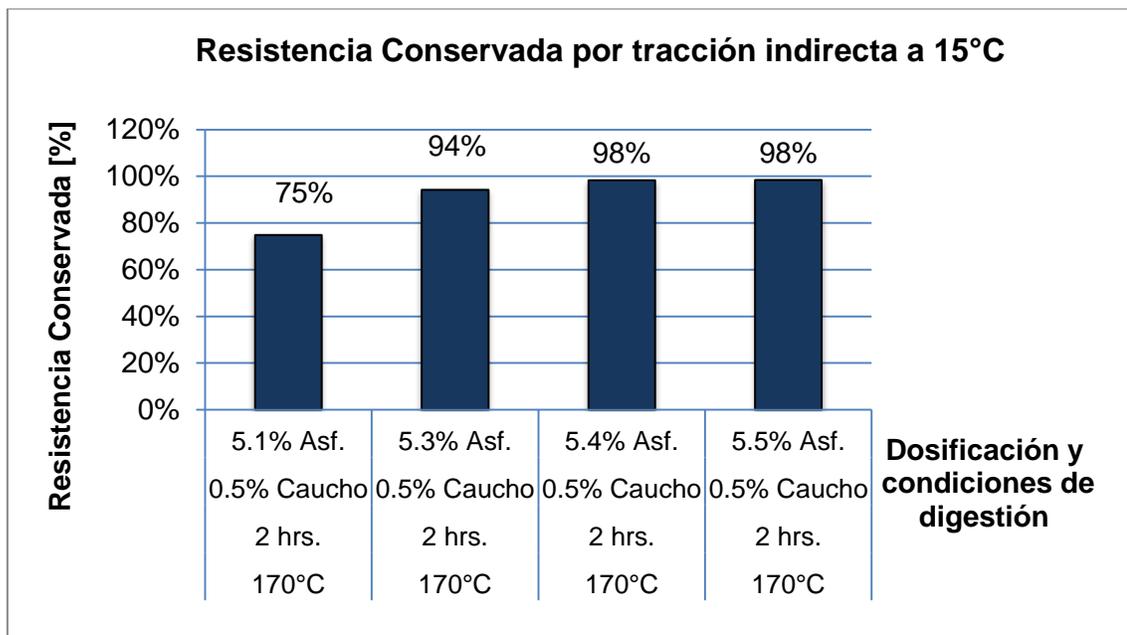


Figura 4-39. Variación de la Resistencia Conservada por tracción indirecta con el contenido de asfalto.

Los valores de resistencia conservada de las mezclas asfálticas evaluadas superan el mínimo exigido de 85% a partir del contenido de asfalto de 5.3%. Sin embargo, se observan diferencias poco significativas entre los valores a partir de esa dotación de asfalto.

Para la dosificación de asfalto de 5.4% y el contenido de polvo de caucho de 0.5%, ambos porcentajes con respecto al agregado, se procede a confeccionar dos series de seis probetas a una temperatura de digestión fija de 170°C y a tiempos de digestión de 1 hora y 1 ½ horas. Los resultados se muestran en la Tabla 4-71. Además en la misma tabla, se incluye el resultado a 2 horas de digestión determinado previamente (Tabla 4-70).

Tabla 4-71. Variación de la Resistencia Conservada por tracción indirecta con el tiempo de digestión.

Contenido de Asfalto	Contenido de Caucho	Digestión		ITS [MPa]		ITSR [%]
		Temperatura	Tiempo	Probetas en Seco	Probetas Sumergidas	
5.4%	0.5%	170°C	1 hrs	2.03	2.08	103
		170°C	1 1/2 hrs	1.76	1.76	100
		170°C	2 hrs	1.71	1.68	98

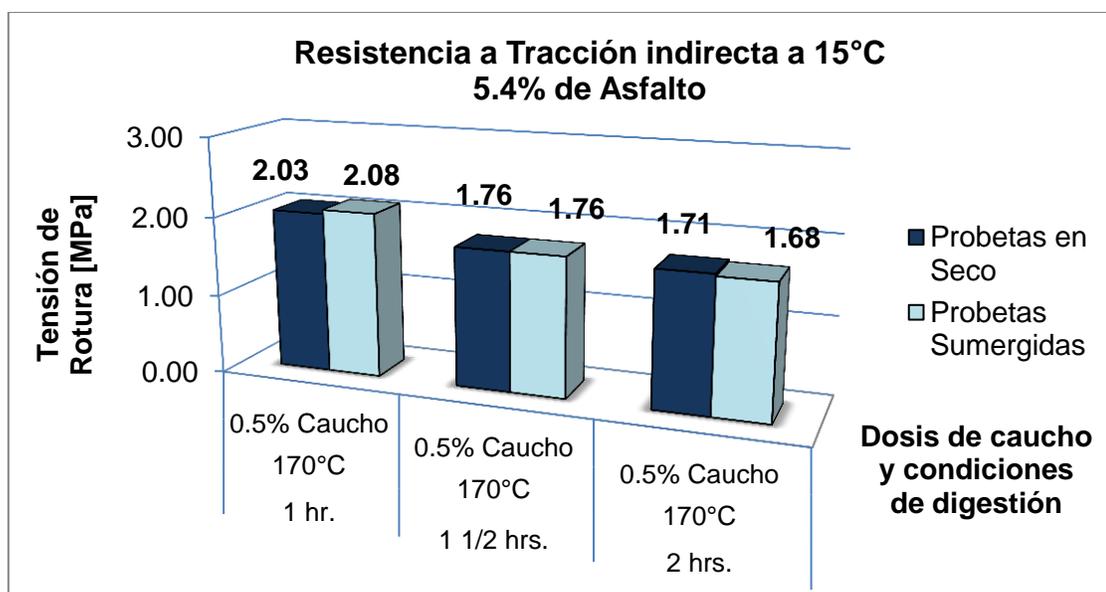


Figura 4-40. Variación de la resistencia a tracción indirecta con el tiempo de digestión.

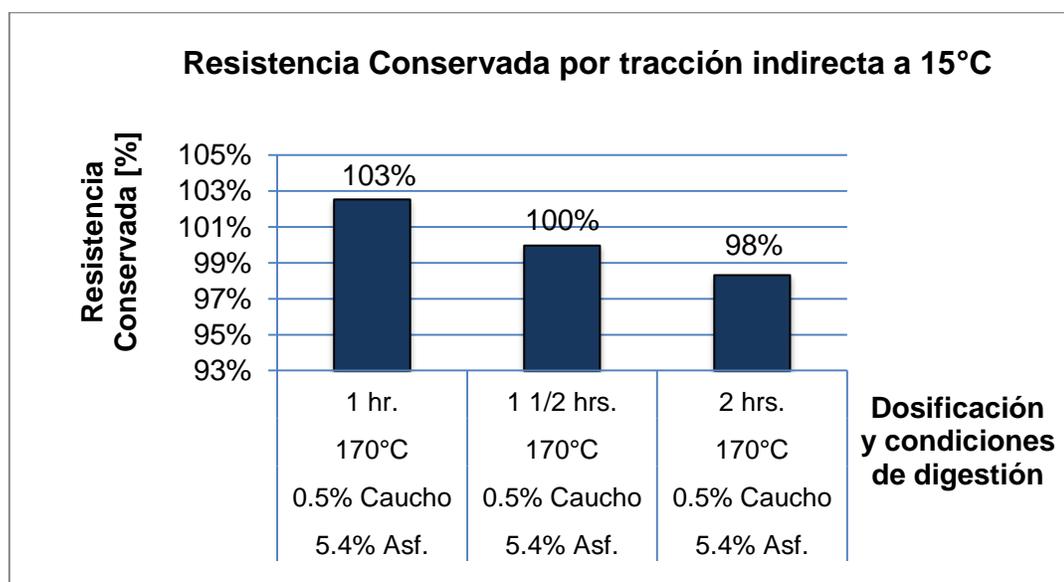


Figura 4-41. Variación de la Resistencia Conservada por tracción indirecta con el tiempo de digestión.

De la Figura 4-41, se observa que todos los valores de resistencia conservada de las mezclas asfálticas evaluadas superan el mínimo exigido de 85%, además se distingue un incremento de la resistencia al disminuir el tiempo de digestión. Esto es un indicador de que el contenido de asfalto absorbido por las partículas de caucho es menor que el absorbido a mayores tiempos, es decir, al no efectuarse un proceso de digestión de manera más efectiva (prolongada), hay más asfalto disponible para envolver las partículas de áridos (mayor espesor de la película de asfalto). De esta manera, el efecto negativo del agua en la cohesión de la mezcla se ve desfavorecido a menor tiempo de digestión, obteniéndose mayores valores de Resistencia Conservada.

Finalmente, considerando que el viaje desde Santiago, donde se ubica la Planta Asfáltica, hasta la V Región, donde se encuentra la Obra, es de mínimo dos horas, se determina este tiempo como el de digestión.

De la Figura 4-39, para el tiempo de digestión señalado, la resistencia conservada más cercana al mínimo exigido, se alcanza para la mezcla dosificada con un contenido de asfalto de 5.3% referido al peso del agregado (considerando un contenido de polvo de caucho 0.5% respecto al peso del agregado y una temperatura de digestión de 170°C).

4.2.2.3. Análisis Marshall

Para definir, la fórmula de trabajo para la fabricación de la mezcla asfáltica modificada a colocar en el segundo Tramo de Prueba, se decide trabajar en conjunto con la Empresa a cargo de la fabricación y colocación de esta mezcla. A diferencia del

primer Tramo de Prueba, donde solo se verificó el cumplimiento de las especificaciones relativas a los parámetros Marshall (Tablas 5.408.203.A y 5.408.203.B del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras), en este nuevo Tramo experimental, se le solicita a la Empresa la realización de un diseño Marshall para determinar el contenido óptimo de asfalto a incorporar (según métodos 8.302.40 y 8.302.47 del M.C.-V-8).

De esta manera, se confeccionan cinco series de tres probetas Marshall (compactadas con 75 golpes por cara), cada una con un porcentaje distinto de asfalto y el mismo contenido de polvo de caucho (0.5% r.a.). Las mezclas previamente a su compactación, son sometidas a un proceso de digestión de 2 horas a 170°C (determinados en el ensayo de Sensibilidad al agua). El detalle de la dosificación de la mezcla modificada a través del Método Marshall y los parámetros relativos al ensayo obtenidos, se presenta en el Anexo B.

Finalmente, el porcentaje óptimo de asfalto determinado por la Empresa es de 5.4% respecto al peso del agregado. Para este contenido de asfalto, se procede a reproducir la mezcla en Laboratorio y determinar los parámetros Marshall (8.302.40 y 8.302.47 del M.C.-V-8). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4-72.

Tabla 4-72. Análisis Marshall y control de calidad, mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho.

Parámetros Marshall			Control de Calidad
Densidad Real Seca	kg/m ³	2648	
Contenido de Asfalto	%	5.4	
Densidad Marshall	kg/m ³	2325	Densidad de diseño ± 20kg/m ³
Densidad Máxima de la Mezcla	kg/m ³	2460	
Estabilidad	N	15104	> 9000
Fluidez	0.25mm	16	8 - 16
Huecos en la Mezcla, Va	%	5.5	4 – 6
Vacíos en el Agregado Mineral, VAM	%	16.7	> 14

Se observa que los parámetros evaluados cumplen los requerimientos para las mezclas asfálticas convencionales (Tablas 5.408.203.A y 5.408.203.B del M.C.-V-5).

4.2.2.4. Fórmula de trabajo

Finalmente para el Tramo de Prueba, la mezcla asfáltica para la capa de rodadura se lleva a cabo con la mezcla modificada con polvo de caucho con un contenido de asfalto de 5.4%.

La fórmula de trabajo visada para la fabricación de la mezcla es la siguiente:

Tabla 4-73. Fórmula de trabajo para la fabricación de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho.

Contenido de Asfalto	% r.a.	5.4 ± 0.3
Contenido de Caucho	% r.a.	0.5
Temperatura de Digestión	°C	170
Tiempo de Digestión	horas	2
Temperatura de Compactación	°C	160
Densidad Marshall	kg/m3	2325
ITSR	%	98

4.2.2.5. Verificación del diseño

A partir del diseño final, la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho se caracteriza y su diseño se valida en Laboratorio, comparando su comportamiento mecánico con el de una mezcla asfáltica tradicional sin incorporación de caucho (con igual dosificación de áridos), según las propiedades que se señalan a continuación:

- Resistencia a la tracción indirecta (UNE-EN 12697-23).
- Módulo resiliente a 15° y 25°C (UNE-EN 12697-26).
- Ahuellamiento y susceptibilidad a la humedad (AASHTO 324-04).

En la Tabla 4-74, se presentan las condiciones de digestión o mezclado, según corresponda, de las mezclas asfálticas con y sin incorporación de polvo de caucho, denominadas respectivamente “Caucho-2 (2hrs.)” y “Sin Caucho-2”. Ambas mezclas se dosifican con el mismo contenido de asfalto (5.4% respecto al peso del agregado).

Tabla 4-74. Condiciones de mezclado/digestión y compactación de mezclas con y sin polvo de caucho.

Tipo de mezcla asfáltica		Sin Caucho-2	Caucho-2 (2hrs)
Contenido de Asfalto	% r.a.	5.4	
Contenido de Caucho	% r.a.	0	0.5
Tiempo Digestión	hrs.	-	2
Temperatura Mezclado/Digestión	°C	160	170
Temperatura Compactación	°C	145	160

4.2.2.5.1. Módulo Resiliente a 15°C y 25°C

La caracterización de la rigidez de los distintos tipos de mezclas asfáltica se realiza mediante el ensayo de tracción indirecta, según el procedimiento descrito en la norma europea UNE-EN 12697-26:2006 anexo C. El ensayo se efectúa a través probetas cilíndricas tipo Marshall compactadas con 75 golpes por cara.

En la Tabla 4-75, se muestran los resultados obtenidos para los módulos resilientes (MR) a 15°C y 25°C, el efecto de la incorporación de polvo de caucho en la rigidez tomando la mezcla asfáltica tradicional como patrón de comparación ($\Delta MR_{\% \text{Caucho}} / MR_{\text{Sin Caucho-2}}$) y la susceptibilidad térmica, obtenida a partir de la variación de este parámetro con la temperatura ($\Delta MR_{T^\circ} / MR_{15^\circ \text{C}}$).

Tabla 4-75. Módulo resiliente y sensibilidad a la temperatura.

Tipo de mezcla asfáltica	MR [MPa]		Variación MR [%]		Sensibilidad a T° [%]
	15°C	25°C	15°C	25°C	
Sin Caucho-2	5410	1859	0	0	66
Caucho-2 (2hrs)	8267	4023	53	116	51

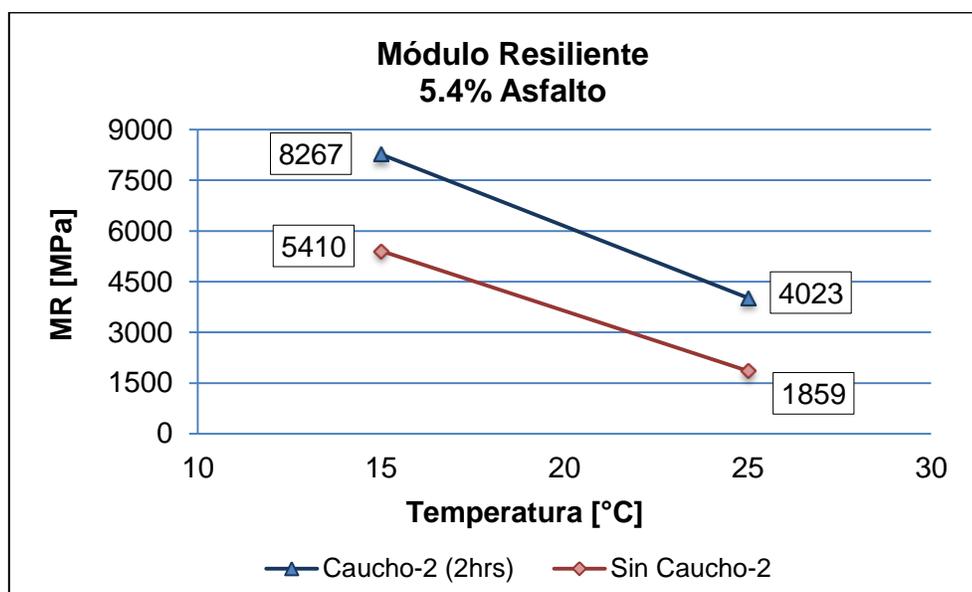


Figura 4-42. Módulo resiliente y sensibilidad a la temperatura.

De la Tabla 4-75, se observa que los módulos resilientes de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho son considerablemente mayores a los de las mezcla sin su incorporación, para ambas temperaturas, siendo este incremento más importante a mayor temperatura (favorable para evitar las deformaciones plásticas a altas temperaturas).

Por otro lado, en la mezcla con adición de polvo de caucho, la susceptibilidad térmica es menor que en la mezcla sin su incorporación (ideal en zonas de climas extremos).

4.2.2.5.2. Resistencia a Tracción indirecta a 15°C

El procedimiento de ensaye para la determinación de la resistencia a tracción indirecta de mezclas asfálticas, se realiza según la norma europea EN 12697-23:2003, a partir de probetas cilíndricas tipo Marshall, compactadas con 50 golpes por cara y ensayadas a 15°C.

En la Figura 4-43, se presentan los resultados obtenidos para la resistencia a tracción indirecta (ITS) de los distintos tipos de mezclas asfálticas en estudio y el aumento porcentual de la resistencia respecto a la mezcla asfáltica convencional tomada como patrón de comparación ($\Delta ITS_{\% \text{Caucho}} / ITS_{\text{Sin Caucho-2}}$).

Tabla 4-76. Resistencia a tracción indirecta.

Tipo de mezcla asfáltica	ITS [MPa]	Variación [%]
Sin Caucho-2	1.44	0
Caucho-2 (2hrs)	1.71	19

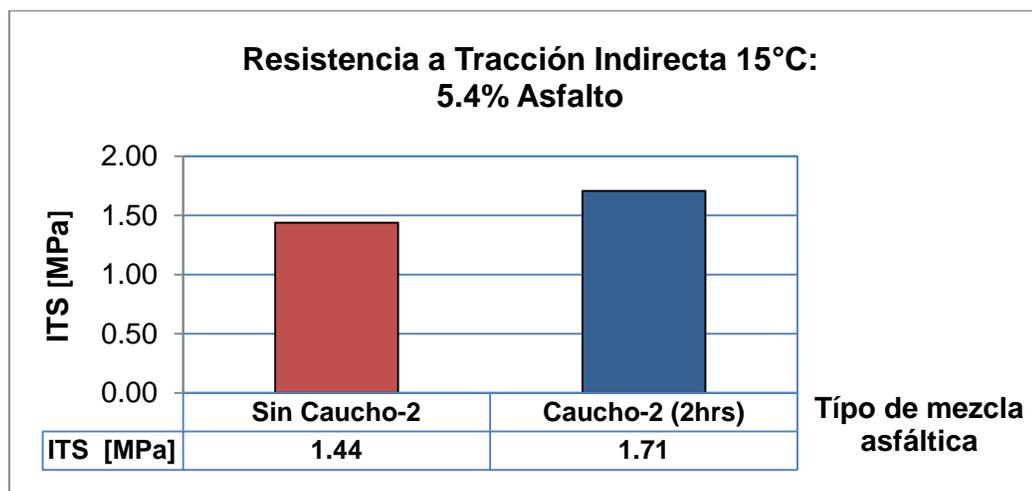


Figura 4-43. Resistencia a tracción indirecta.

De los resultados obtenidos, la resistencia a tracción indirecta de la mezcla asfáltica con polvo de caucho es superior al de la mezcla sin su incorporación (la resistencia aumenta un 19%), esto se debe a que el polímero en cuestión aumenta la viscosidad del ligante, provocando así que este mejore su capacidad cohesiva.

4.2.2.5.3. Ahuellamiento bajo agua a 50°C

El ensayo de ahuellamiento se realiza bajo agua a 50°C con el dispositivo Rueda de Hamburgo, según el procedimiento descrito en la norma americana AASHTO T324-04. Para el ensayo se utilizan probetas cilíndricas de 150mm de diámetro y 60mm de altura, compactadas mediante el compactador giratorio hasta el 97% de la densidad de diseño.

En el gráfico Profundidad de Ahuellamiento versus el número de pasadas de rueda (Figura 4-44), se muestran las curvas representativas de ambos tipos de mezclas asfálticas. A partir de estas, se caracterizan las mezclas analizadas según los siguientes parámetros.

- **SIP:** Punto de desprendimiento del asfalto (N° Pasadas).
- **NF:** Número de pasadas de la rueda en la falla (N° Pasadas).
- **Ah:** Ahuellamiento (mm).
- **CS:** Pendiente de deformación (mm/1000 Pasadas).
- **SS:** Pendiente de desprendimiento (mm/1000 Pasadas).

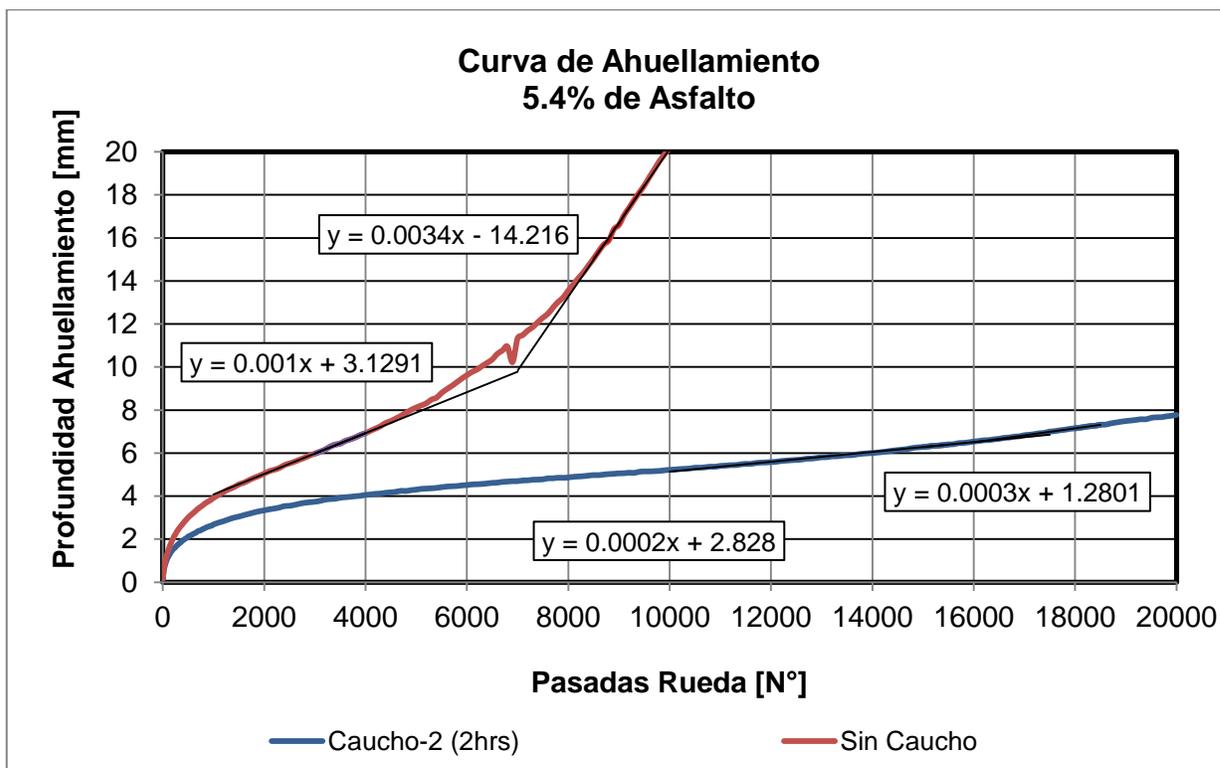


Figura 4-44. Ahuellamiento bajo agua a 50°C por ensayo de Hamburgo.

De la Tabla 4-77, se observa que la mezcla asfáltica tradicional se deforma rápidamente alcanzado los 20mm de ahuellamiento antes de concluir las 20000 pasadas, a diferencia de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho, que alcanzan ese número de pasadas con profundidades del orden de los 8mm.

Tabla 4-77. Condición de término en ensayo de Hamburgo.

Tipo de mezcla asfáltica	NF	Ah _{NF}
	[N° Pasadas]	[mm]
Sin Caucho-2	10600	21.5
Caucho-2 (2hrs)	20000	7.8



Figura 4-45. Probetas ensayadas en la Rueda de Hamburgo.

Para el número de falla de la mezcla asfáltica sin incorporación de caucho (10600 pasadas de rueda), se determinan las profundidades de ahuellamiento de manera porcentual, respecto a la altura de la probeta (60mm). Esto se muestra en la Tabla 4-78, para ambos casos.

En la mezcla asfáltica tradicional, la huella alcanza una profundidad de 36% de la altura de la probeta, a diferencia de la mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho, donde la profundidad relativa es de 9%.

Tabla 4-78. Ahuellamiento en la falla de la mezcla asfáltica convencional.

Tipo de mezcla asfáltica	NF Sin Caucho-2	Ah _{NF sin caucho-2}	
	[N° Pasadas]	[mm]	[%]
Sin Caucho-2	10600	21.5	36
Caucho-2 (2hrs)		5.3	9

En la Tabla 4-79, se presentan los restantes parámetros de caracterización obtenidos en el ensayo. Se observa que la mezcla con incorporación de polvo de caucho presenta mayor resistencia a la disgregación (SIP) que la mezcla asfáltica tradicional, lo que es indicativo de que el caucho mejora la adherencia del árido con el ligante, retrasando la penetración del agua en la película de asfalto y su consecuente despegue de las partículas de árido.

Por otro lado, las velocidades de deformación antes y después del punto de desprendimiento (SIP), dada por la pendiente CS y SS respectivamente, son notoriamente más bajas en la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho que en la mezcla asfáltica sin la incorporación de este polímero. En este último caso, la acción del agua después del SIP, se hace evidente y su efecto muy desfavorable; se alcanza la falla por deformación (20mm) rápidamente. Por el contrario, en el caso de las mezclas asfálticas con polvo de caucho, ambas pendientes (CS y SS) se mantienen casi constantes, lo que indica que a pesar de la penetración del agua, el desprendimiento de árido y la deformación producida por su efecto, son mínimos.

Tabla 4-79. Parámetros de ahuellamiento por ensayo de Hamburgo.

Tipo de Mezcla asfáltica	SIP	Ah _{SIP}	CS	SS
	[N° Pasadas]	[mm]	[mm/1000 Pasadas]	[mm/1000 Pasadas]
Sin Caucho-2	7227	11.7	1.00	3.40
Caucho-2 (2hrs)	15479	6.4	0.20	0.30

4.2.3. Confección de la capa asfáltica de rodadura en el Tramo de Prueba

4.2.3.1. Fabricación en Planta y colocación en terreno

Los trabajos de fabricación y colocación de la mezcla asfáltica con polvo de caucho en el Tramo de Prueba se desarrollan en las fechas y con el rendimiento señalados en la Tabla 4-80. La mezcla asfáltica modificada es preparada en una Planta Asfáltica, ubicada en la Región Metropolitana, comuna de Pudahuel (ubicada aproximadamente a dos horas de la Obra).

Tabla 4-80. Fechas de la pavimentación del Tramo de Prueba y rendimiento.

Faja	Izquierda (Pista N° 2+ Berma)		Derecha (Pista N° 1+ Berma)	
Fecha de colocación	16.11.2012	19.11.2012	19.11.2012	20.11.2012
Tramo colocado	Km 19800 a Km 19400	Km 19400 a Km 19300	Km 19800 a Km 19365	Km 19365 a Km 19300
Rendimiento [m]	400	100	435	65

La Planta es de tipo continua y su funcionamiento y componentes principales son idénticos al de la Planta utilizada para la confección de la mezcla asfáltica modificada en el primer tramo experimental.

Los equipos para la ejecución de los trabajos de colocación en terreno son los siguientes:

- 1 terminadora autopropulsada (finisher) de ancho 5m.
- 2 rodillos lisos.
- 1 rodillo neumático.
- 1 densímetro nuclear.
- equipamiento como rastrillo, palas, carretillas, termómetros, etc.

Los trabajos de colocación de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho en terreno (Tramo de Prueba), se detallan en las siguientes imágenes:



Figura 4-46. Confección de la mezcla asfáltica con polvo de caucho en Planta.



Figura 4-47. Preparación de la superficie (riego de liga) y carga de la finisher.



Figura 4-48. Control de la temperatura durante la extensión de la mezcla asfáltica modificada y muestreo (en finisher).



Figura 4-49. Colocación de la mezcla asfáltica modificada al espesor proyectado.



Figura 4-50. Extensión y compactación en pista N° 2 (rodillo liso).



Figura 4-51. Compactación en pista N° 2 (rodillo liso y rodillo neumático).



Figura 4-52. Compactación de pista N° 2 finalizada.

4.2.3.2. Antecedentes

4.2.3.2.1. Control de temperaturas en Tramo de Prueba

En la Tabla 4-81, se presenta el registro de temperaturas durante la colocación del concreto asfáltico en carpeta en el Tramo de Prueba. Se debe tener presente que la temperatura de extensión corresponde a la temperatura una vez cumplido el tiempo de digestión de dos horas. Además, para que el proceso de digestión se realice a 170°C y el de compactación a 160°C, según la fórmula de trabajo (Tabla 4-73), el mezclado en Planta se decide efectuar a 175°C (temperatura a la salida de la Planta).

Tabla 4-81. Control de temperaturas en el Tramo de Prueba.

Faja (Pista + Berma)		Izquierda		Derecha	
Tramo colocado	Km _i	19800	19400	19800	19365
	Km _f	19400	19300	19365	19300
Temperatura ambiente [°C]		15	21	22	18
Temperatura de mezcla asfáltica [°C]	Salida de la planta	175	175	175	175
	Extensión	160	160	160	160
	Compactación	155	152	152	150

De acuerdo a las temperaturas de compactación, ambas pistas se trabajaron de manera muy similar, a temperaturas superiores a los 145°C (levemente más caliente que una mezcla asfáltica tradicional). Además, con la utilización de dos rodillos lisos, se facilitó el inicio de la compactación a mayores temperaturas, ya que estos se mantuvieron relativamente cerca de la finisher.

4.2.4. Controles Receptivos

Los ensayos para determinar la condición funcional como estructural del pavimento en el Contrato, tanto en el sector del Tramo de Prueba, confeccionado con la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho, como en el sector confeccionado con la mezcla asfáltica tradicional (capa de rodadura), se resumen en la Tabla 4-82.

Tabla 4-82. Controles receptivos en el Contrato Mejoramiento Ruta F-50.

Control	Metodología de ensayo			Tramo de Prueba	Tramo con mezcla asfáltica tradicional
	Variable de Medición	Equipo/Muestra	Método		
Condiciones Estructurales	Contenido de asfalto	Muestras de Mezcla asfáltica	8.302.56	√	√
	Granulometría		8.302.28	√	
	DMM		8.302.37	√	√
	Espesor	Testigos extraídos del pavimento	8.302.38	√	√
	Contenido de Huecos		8.302.47	√	√
	Compactación		8.302.41	√	√
	Módulo Resiliente		UNE - EN 12697 - 26	√	√
	Deflexiones	Deflectómetro de Impacto (FWD)	8.502.5	√	√
8.502.6					
Condiciones Funcionales	Rugosidad (IRI)	Perfilómetro Láser	8.502.8	√	√
	Resistencia al Deslizamiento	Péndulo Británico TRRL	8.502.16	√	√
		SCRIM	8.502.17	√	√
	Macrotextura	Equipo del Círculo Arena	8.502.14	√	√

Los parámetros medidos en el Tramo de Prueba se evalúan aplicando las especificaciones de las mezclas asfálticas en caliente convencionales, descritas en los numerales 5.408.303 y 5.408.304 del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras.

4.2.4.1. Controles a mezclas asfálticas

Se realizan los correspondientes controles tanto a la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho por vía seca (Tramo de Prueba), como a la mezcla asfáltica tradicional. La evaluación se realiza a partir de muestras individuales tomadas durante su colocación en terreno (en capa de rodadura), y son representativas de la mezcla

transportada por un solo camión. A las muestras de mezcla asfáltica se les realizan ensayos para determinar su contenido de asfalto y su densidad máxima sin compactar (DMM); que permiten evaluar la calidad de la mezcla fabricada en Planta.

4.2.4.1.1. Control del Contenido de asfalto

La determinación del contenido de asfalto se realiza a través del Método por Ignición descrito en 8.302.56 del M.C.-V.8. El tamaño mínimo exigido para las muestras de mezcla asfáltica de ensayo es de 2000g (según tamaño máximo nominal del árido).

4.2.4.1.1.1. Mezcla asfáltica tradicional

Para determinar el factor de corrección de la mezcla asfáltica tradicional, influenciado solo por el árido, se procede a quemar una muestra de los agregados sin ligante asfáltico, preparada en Laboratorio de acuerdo con la dosificación de diseño de los áridos. La diferencia de peso de la masa inicial y final, expresada en porcentaje referido al agregado, corresponde al factor de corrección. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 4-83. Factor de corrección por agregado, mezcla asfáltica tradicional.

Horno de Ignición	Unidad	Agregado
Factor de Corrección	[%]	0.31

Los contenidos de asfalto de las muestras tomadas en terreno se deben corregir, restándoles el factor de corrección calculado (Ecuación 4-1), y evaluar según el procedimiento descrito en 5.408.304(3) del M.C.-V.5. Para carpetas de rodadura, se establece que una muestra individual es aceptable si su porcentaje de asfalto corregido (Pt) queda comprendido en $P_b \pm 0.3 \%$, siendo P_b el porcentaje de asfalto de la dosificación de diseño (5.1% referido al peso del agregado).

En las tablas siguientes se presentan los contenidos de asfalto obtenidos, corregidos (Pt) y sin corregir (P_{HI}). Se incluye además la diferencia entre el porcentaje de asfalto corregido con el de la dosificación de diseño ($P_t - P_b$), que debe estar comprendida en $\pm 0.3\%$, según lo señalado.

Tabla 4-84. Control del contenido de asfalto, tramo con mezcla asfáltica tradicional.

N° Pista	Km	P _{HI} [%]	FC [%]	P _t [%]	P _t - P _b [%]
1	18.700	5.31	0.31	5.00	-0.1
	18.900	5.45		5.14	0.0
	19.050	5.18		4.87	-0.2
2	18.500	5.45		5.14	0.0
	18.620	5.39		5.08	0.0
	19.000	5.46		5.15	0.1

Todas, las muestras de ensayo verifican la exigencia; los contenidos de asfalto están dentro de la tolerancia requerida.

4.2.4.1.1.2. Mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho

- **Factor de corrección**

Para determinar el factor de corrección de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho por vía seca, se calcinan dos muestras (de 2000g) en el Horno de Ignición, las cuales son preparadas en Laboratorio de acuerdo al diseño; dosificadas con 5.4% de asfalto y 0.5% de polvo de caucho, ambos porcentajes referidos al peso del agregado, y sometidas al proceso de digestión de 2 horas a 170°C.

A partir de la diferencia entre el porcentaje de asfalto determinado por ignición y el porcentaje de asfalto con que se dosifican las mezclas (5.4%), se calculan los factores de corrección para cada una de ellas. El promedio de ambos, define el factor de corrección característico de la mezcla. Los valores individuales y el factor de corrección final se muestran en la Tabla 4-85.

Tabla 4-85. Factor de corrección por agregado y polvo de caucho, mezcla asfáltica modificada por vía seca.

Horno de Ignición		Unidad	Mezcla 1	Mezcla 2
Cont. Asfalto sin corregir		[%]	6.39	6.37
Cont. Asfalto diseño		[%]	5.40	5.40
Factor de Corrección	Valor individual	[%]	0.99	0.97
	Promedio	[%]	0.98	

Finalmente, los contenidos de asfalto obtenidos por el Método de Ignición se deben corregir restándoles el factor de corrección calculado (Ecuación 4-1).

- **Evaluación del porcentaje de asfalto corregido**

Para evaluar los contenidos de asfalto corregido (P_t) obtenido de las muestras incineradas, se aplican los mismos criterios que las mezclas asfálticas convencionales, según el procedimiento descrito en 5.408.304(3) del M.C.-V.5.

En las tablas siguientes se presentan los resultados obtenidos de la ignición de las muestras, tanto los valores corregidos (P_t) y sin corregir (P_{HI}). Se incluye además la diferencia entre el porcentaje de asfalto corregido (P_t) con el porcentaje de asfalto de la dosificación de diseño (P_b , igual a 5.4% referido al peso del agregado); diferencia que debe estar comprendida en $\pm 0.3\%$, según lo señalado para capas de rodadura.

- **Pista N° 1**

Tabla 4-86. Control del contenido de asfalto en el Tramo de Prueba, pista N° 1.

N° Pista	Km	P_{HI} [%]	FC [%]	P_t [%]	$P_t - P_b$ [%]
1	19.600	5.47	0.98	4.49	-0.9
	19.640	5.56		4.58	-0.8
	19.670	5.33		4.35	-1.1

- **Pista N° 2**

Tabla 4-87. Control del contenido de asfalto en el Tramo de Prueba, pista N° 2.

N° Pista	Km	P_{HI} [%]	FC [%]	P_t [%]	$P_t - P_b$ [%]
2	19.620	5.75	0.98	4.77	-0.6
	19.720	5.88		4.90	-0.5
	19.780	5.64		4.66	-0.7

De los valores obtenidos, ninguna muestra verifica la tolerancia exigida ($\pm 0.3\%$). Los contenidos de asfalto presentan diferencias con la dosificación de diseño que bordean el 0.9%, en la pista N° 1 y 0.6%, en la pista N° 2.

Estos resultados no permiten comprobar el factor de corrección determinado en Laboratorio de 0.98% para esta mezcla asfáltica. Esta calibración parece ser muy

estricta, y demostraría que gran parte del caucho de las muestras fabricadas en Planta, no está siendo calcinando y solo lo está haciendo el árido.

Para establecer un valor estimativo de la influencia del árido en el factor de corrección de la mezcla asfáltica modificada, se puede considerar el factor de corrección de la mezcla asfáltica tradicional determinado previamente, de 0.31% (Tabla 4-83). Dado que la pérdida por agregado más polvo de caucho ($0.5\% + 0.31\% = 0.81\%$), suponiendo que este último se quema de manera integral al calcinar la mezcla asfáltica modificada, es menor que el FC de 0.98% obtenido, se concluye que la incorporación de polvo de caucho en una mezcla asfáltica podría generar más pérdida por árido que las mezclas asfálticas tradicionales.

En la Tabla 4-88, se presentan los contenidos de asfalto determinados por ignición de todas las muestras ensayadas, corregidos sólo por agregado. Como se observa, todas las muestras, salvo una, verifican este factor de corrección. Esto demostraría que el factor de calibración para estas mezclas especiales, es variable y quedaría comprendido entre el factor de corrección por agregado (producto de la calcinación de la mezcla de áridos) y el factor de corrección por agregado más polvo de caucho (producto de la calcinación de dos muestras de mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho).

Tabla 4-88. Control del contenido de asfalto en el Tramo de Prueba (factor de corrección por agregado).

N° Pista	Km	P _{HI} [%]	FC [%]	P _t [%]	P _t - P _b [%]
1	19.600	5.47	0.31	5.16	-0.2
	19.640	5.56		5.25	-0.2
	19.670	5.33		5.02	-0.4
2	19.620	5.75		5.44	0.0
	19.720	5.88		5.57	0.2
	19.780	5.64		5.33	-0.1

4.2.4.1.2. Control de la Granulometría

4.2.4.1.2.1. Mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho

Se determina la granulometría del árido residual tras la ignición de la muestra de mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho tomada en el Km 19600 en la Pista N° 1. La granulometría de los áridos debe quedar comprendida dentro de la banda de trabajo (Tabla 4-63), según se establece en 5.408.302 (3) del M.C.-V-5.

Tabla 4-89. Control de la granulometría (método de ignición), Tramo de Prueba.

Tamiz		% Pasa	Banda de Trabajo	
mm	ASTM		% Pasa	
20	3/4"	100	100	100
12.5	1/2"	86	78	88
10	3/8"	73	69	79
5	N°4	47	47	57
2.5	N°8	30	30	38
0.63	N°30	15	11	17
0.315	N°50	11	7	13
0.16	N°100	8	5	9
0.08	N°200	6	4.7	7.7

La granulometría de la muestra de áridos cumple la banda de trabajo. Se debe notar que, aunque pueden quedar partículas de caucho retenidas en los tamices correspondientes a los áridos de menor tamaño, dado el pequeño porcentaje de polvo de caucho que se utiliza y su baja densidad relativa, puede considerarse que su contribución a la determinación granulométrica es despreciable.

4.2.4.1.3. Control de la Densidad Máxima de la Mezcla (DMM)

La determinación de la densidad máxima de la mezcla (DMM) de las muestras de mezcla asfáltica con y sin incorporación de polvo de caucho tomadas en terreno, se realiza a través del Método descrito en 8.302.37 del M.C-V.8. Dado que el tamaño máximo nominal del agregado de la mezcla es de 20mm (Tamiz ASTM 3/4"), el tamaño mínimo de la muestra asfáltica de ensaye, es de 2000g.

La densidad máxima de la mezcla se compara con la obtenida en la dosificación de diseño. No hay especificaciones relativas a este parámetro, pero en general se considera razonable que el valor de terreno este en el rango de $\pm 20\text{kg/m}^3$ del de diseño. Además, una vez obtenida la densidad de los testigos extraídos del pavimento, con este parámetro, se podrá calcular el porcentaje de huecos de terreno.

4.2.4.1.3.1. Mezcla asfáltica tradicional

Los resultados del DMM de las muestras de mezcla asfáltica tradicional se presentan en la Tabla 4-90. Estos se comparan con el valor del DMM de diseño (Tabla 4-68).

Tabla 4-90. Control de la densidad máxima de la mezcla, tramo con mezcla asfáltica tradicional.

N° Pista	Km	DMM [kg/m ³]	DMM diseño [kg/m ³]
1	18.900	2515	2491
2	18.620	2510	

Los valores obtenidos se encuentran cercanos al límite superior recomendado; solo una muestra, lo supera levemente.

4.2.4.1.3.2. Mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho

Los resultados del DMM de las muestras de mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho por vía seca se presentan en la Tabla 4-91. Los valores se comparan con el DMM de diseño (Tabla 4-72).

Tabla 4-91. Control de la densidad máxima de la mezcla, Tramo de Prueba.

N° Pista	Km	DMM [kg/m ³]	DMM promedio [kg/m ³]	DMM diseño [kg/m ³]
1	19.600	2479	2474	2460
	19.640	2473		
	19.670	2471		
2	19.620	2462	2471	
	19.720	2472		
	19.780	2478		

Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango recomendado.

4.2.4.2. Controles al pavimento terminado

4.2.4.2.1. Controles a Testigos

A partir de testigos cilíndricos extraídos tanto en el Tramo de Prueba como en el tramo con mezcla asfáltica tradicional, se determinan espesores, densidades, contenido de huecos y módulos resilientes a 15°C y 25°C del respectivo concreto asfáltico de la capa de rodadura.

Los testigos se extrajeron el 22.04.2013 en la Pista N° 1 y el 23.04.2013 en la Pista N° 2, aproximadamente seis meses después del término de las faenas de

pavimentación. La extracción de las muestras se realiza en la huella externa, a 70cm del borde de la pista evaluada. En el caso del Tramo de Prueba, se obtuvieron cuatro testigos por pista a razón de una muestra cada 100m (Km 19.460, Km 19.560, Km 19.660 y Km 19.760), y en el caso del sector con mezcla asfáltica tradicional, solo se obtuvieron dos testigos por pista, en un solo kilometraje (Km 20.950). No se pudo extraer más testigos en ese sector, dado que los trabajos en el Contrato aún no habían finalizado.

4.2.4.2.1.1. Control de la Compactación

La compactación de la capa de rodadura se controla a partir de la medición de la densidad realizada a los testigos (método descrito en 8.302.38 del M.C-V.8). El porcentaje de compactación de cada testigo debe ser mayor o igual a 97% de la densidad de diseño Marshall, según lo establecido para calzadas en 5.408.304(1) del M.C-V.5. Se debe tener en cuenta que en el Tramo de Prueba, la densidad Marshall es 2325kg/m^3 , y en el caso del tramo con mezcla asfáltica tradicional, la densidad de diseño (Contratista) es de 2362kg/m^3 .

Los resultados se presentan en la Tabla 4-92 y en la Tabla 4-93.

- Pista N° 1

Tabla 4-92. Control de la compactación, pista N° 1.

N° Testigo	Km puntual	Densidad Terreno	Densidad Promedio	Densidad Marshall	Compactación	Tipo de mezcla asfáltica
		[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]	
1c	19.460	2349	2236	2325	101	Mezcla con polvo de caucho
3c	19.560	2321			100	
5c	19.660	2332			100	
7c	19.760	2341			101	
1sc	20.950	2315	2320	2362	98	Mezcla tradicional
3sc	20.950	2325			98	

- **Pista N° 2**

Tabla 4-93. Control de la compactación, pista N° 2.

N° Testigo	Km puntual	Densidad Terreno	Densidad Promedio	Densidad Marshall	Compactación	Tipo de mezcla asfáltica
		[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]	
2c	19.760	2314	2336	2325	100	Mezcla con polvo de caucho
4c	19.660	2329			100	
6c	19.560	2331			100	
8c	19.460	2369			102	
2sc	20.950	2325	2304	2362	98	Mezcla tradicional
4sc	20.950	2282			97	

En el Tramo de Prueba, los resultados de la compactación de la capa de rodadura son parejos. En la pista N° 1, las densidades de los testigos fluctúan entre un 100% y un 101% de la densidad Marshall, con un valor promedio de 2336kg/m³ (101%), y por lo tanto, las cuatro muestras verifican la especificación. En la pista N° 2, los resultados son similares; la compactación de las cuatro muestras fluctúan entre un 100% y un 102% de la densidad de diseño, con una densidad promedio de 2336kg/m³ (101%), y todas cumplen la compactación mínima requerida.

Los resultados en el tramo con mezcla asfáltica tradicional, son similares; se cumple el requerimiento de compactación con una densidad promedio de 2320kg/m³ (98% densidad Marshall) en la pista N° 1, y de 2304kg/m³ (98% densidad Marshall) en la pista N° 2.

- **Contenido de Vacíos de Aire (Va)**

Con la densidad promedio de los testigos extraídos en el Tramo de Prueba y el DMM promedio de la mezcla asfáltica correspondiente (Tabla 4-91), se calcula el porcentaje de huecos (Va) de la capa de rodadura (procedimiento en 8.302.47 4.7 del M.C.-V.8). Los valores resultantes para ambas pistas se observan en la Tabla 4-94.

Tabla 4-94. Contenido de huecos, Tramo de Prueba.

N° Pista	Densidad	DMM	Va
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]
1	2336	2474	5.6
2	2336	2471	5.5

De igual manera, para el sector con la mezcla asfáltica tradicional se determina, a partir de la densidad promedio de los testigos respectivos y el DMM promedio de la mezcla asfáltica tradicional (Tabla 4-90), el porcentaje de huecos (Va) de la capa de rodadura. Los resultados para ambas pistas se observan en la Tabla 4-95.

Tabla 4-95. Contenido de huecos, tramo con mezcla asfáltica tradicional.

N° Pista	Densidad	DMM	Va
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]
1	2320	2513	7.7
2	2304	2513	8.3

Los contenidos de vacíos de la capa de rodadura en el Tramo de Prueba son parejos para ambas pistas, y promedian 5.6%. Este valor resulta bajo y puede indicar una sobrecompactación de la mezcla. Por otro lado, los huecos en el sector con mezcla asfáltica tradicional, que promedian 8.0%, se encuentra en el rango normal.

4.2.4.2.1.2. Control del Espesor

El espesor de los testigos extraídos se determina con el método descrito en 8.302.41 del M.C-V.8 y la evaluación se realiza por muestras individuales, según el procedimiento descrito en 5.408.304(2) del M.C -V.5. Los espesores de la capa de rodadura, deben ser mayores o iguales al espesor de proyecto de 50mm para ambos tramos (con y sin incorporación de polvo de caucho).

Los resultados para ambas pistas se observan en las siguientes tablas. Se incluyen además los promedios de las muestras para cada tipo de mezcla analizada.

- **Pista N° 1**

Tabla 4-96. Control del espesor, pista N° 1.

N° Testigo	Km puntual	Espeor	Espeor Promedio	Espeor Proyecto	Tipo de mezcla asfáltica
		[mm]	[mm]	[mm]	
1c	19.460	61	55	50	Mezcla con polvo de caucho
3c	19.560	53			
5c	19.660	52			
7c	19.760	52			
1sc	20.950	55	55	50	Mezcla tradicional
3sc	20.950	56			

- Pista N° 2

Tabla 4-97. Control del espesor, pista N° 2.

N° Testigo	Km puntual	Espesor	Espesor Promedio	Espesor Proyecto	Tipo de mezcla asfáltica
		[mm]	[mm]	[mm]	
2c	19.760	54	53	50	Mezcla con polvo de caucho
4c	19.660	56			
6c	19.560	51			
8c	19.460	52			
2sc	20.950	54	53	50	Mezcla tradicional
4sc	20.950	51			

Todas las muestras, tanto las extraídas en el Tramo de Prueba como las del tramo convencional, superan el mínimo exigido.

4.2.4.2.1.3. Control del Módulo Resiliente

Los resultados del módulo resiliente de los testigos, determinados por compresión diametral según UNE 12697-26 anexo C, a 15°C y a 25°C, se muestran en las siguientes tablas, para cada tipo de mezcla asfáltica utilizada en carpeta.

- Pista N° 1

Tabla 4-98. Control del módulo resiliente, pista N° 1.

N° Testigo	Km puntual	MR a 15°C	MR a 25°C	Tipo de mezcla asfáltica
		[MPa]	[MPa]	
1c	19.460	7940	3706	Mezcla con polvo de caucho
3c	19.560	7015	3385	
5c	19.660	7683	3871	
7c	19.760	8625	4431	
1sc	20.950	4345	1483	Mezcla tradicional
3sc	20.950	-	-	

- Pista N° 2

Tabla 4-99. Control del módulo resiliente, pista N° 2.

N° Testigo	Km puntual	MR a 15°C	MR a 25°C	Tipo de mezcla asfáltica
		[MPa]	[MPa]	
2c	19.760	6848	3444	Mezcla con polvo de caucho
4c	19.660	6963	3491	
6c	19.560	8675	4176	
8c	19.460	8578	3853	
2sc	20.950	4699	1673	Mezcla tradicional
4sc	20.950	3508	1238	

A modo comparativo, para los valores representativos del Tramo de Prueba (terreno), se calcula el módulo resiliente promedio y la susceptibilidad térmica, para contrastarlos con los valores respectivos obtenidos en Laboratorio a partir de probetas. Los resultados conseguidos, en cada pista, se muestran a continuación:

Tabla 4-100. Módulo resiliente de Terreno y Laboratorio, pista N° 1.

Muestra	MR a 15°C	MR a 25°C	Susceptibilidad Térmica
	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Terreno	7816	3848	51
Laboratorio	8267	4023	51
MR_{Terreno} / MR_{Laboratorio}	95	96	

Tabla 4-101. Módulo resiliente de Terreno y Laboratorio, pista N° 2.

Muestra	MR a 15°C	MR a 25°C	Susceptibilidad Térmica
	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Terreno	7766	3741	52
Laboratorio	8267	4023	51
MR_{Terreno} / MR_{Laboratorio}	94	93	

En ambas pistas, los valores del módulo resiliente de las muestras de terreno son los esperados, según los resultados obtenidos en Laboratorio. En la pista N° 1, los valores conseguidos representan alrededor del 95% de los de Laboratorio a ambas temperaturas, mientras que en la pista N° 2, los módulos representativos del pavimento llegan aproximadamente al 93% de los de Laboratorio, a 15°C y 25°C.

Con respecto a la susceptibilidad térmica, los resultados de las muestras de terreno son similares a los obtenidos en Laboratorio.

4.2.4.2.2. Control de la Deflexión

La medición de deflexiones mediante el Deflectómetro de Impacto FWD (KUAB del LNV), se lleva a cabo el 7.05.2013, aproximadamente a seis meses de dado el tránsito, tanto en el Tramo de Prueba (mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho) como en un tramo con la mezcla asfáltica tradicional (Km 0.500 al Km 1.000). La medición se realiza según el procedimiento descrito en 8.502.5 del M.C.-V.8, en el centro de cada pista, a intervalos uniformes de 50m, incluyendo además las ubicaciones donde se extrajeron los testigos (huella externa).

Para la caracterización de la condición estructural de los pavimentos, se efectúa el Retroanálisis según el procedimiento descrito en 8.502.6. Para el paquete estructural (capas aglomeradas y capas granulares) de espesor total 43cm, se calcula el Número Estructural efectivo (NEef), y para el suelo de fundación (subrasante) se calcula el Módulo Resiliente (MR). Además, se determina la Deflexión máxima normalizada de la superficie del pavimento (DMX).

Los resultados obtenidos se muestran a continuación. Los sectores en blanco corresponden a los tramos de prueba respectivos a la mezcla con RAP y al diseñado con un método mecanicista.

- Deflexión máxima: Pista N° 1 y Pista N° 2.

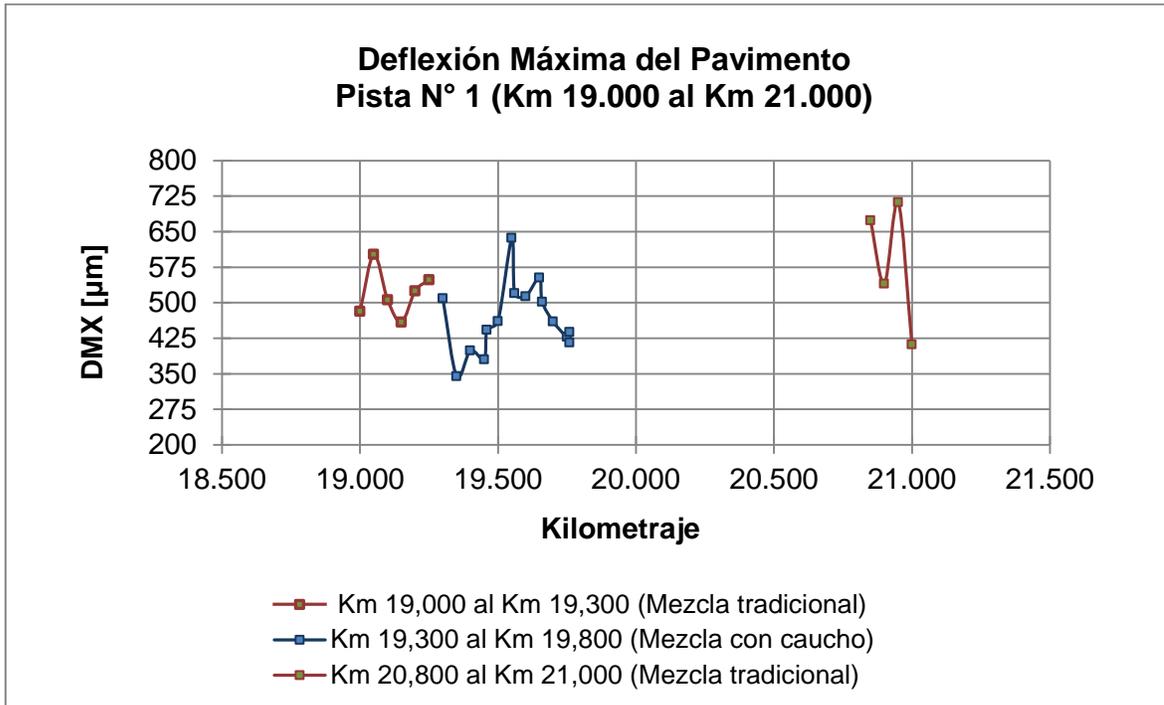


Figura 4-53. Deflexión máxima, pista N° 1 (7.05.2013).

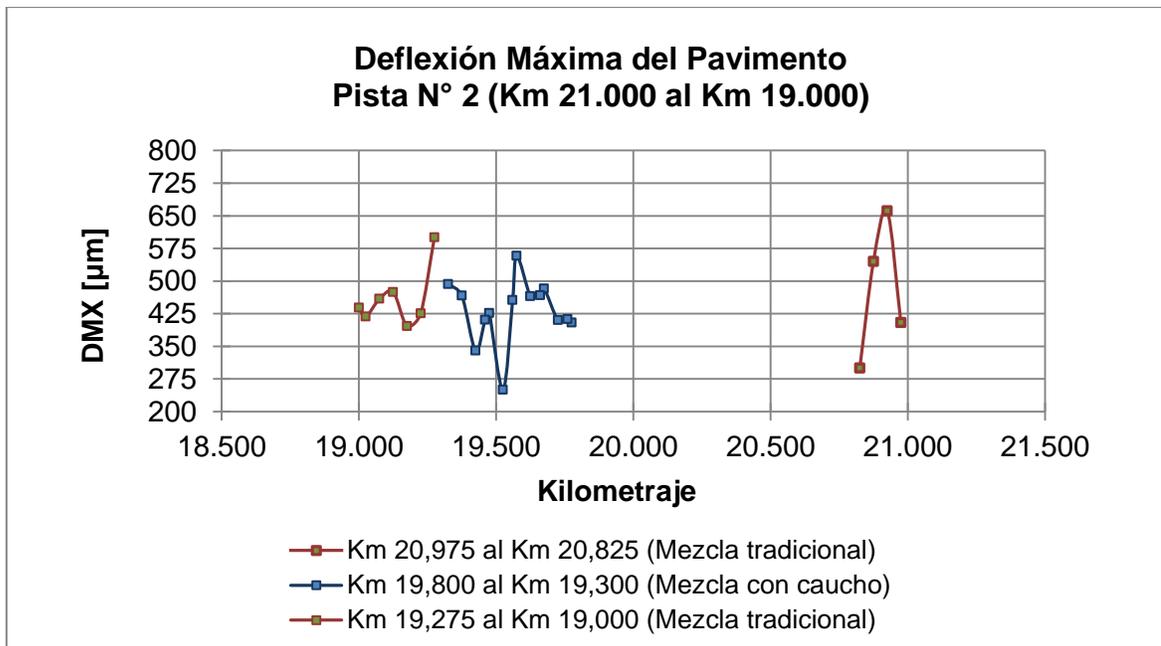


Figura 4-54. Deflexión máxima, pista N° 2 (7.05.2013).

- **Módulo Resiliente de la Subrasante: Pista N° 1 y Pista N° 2.**

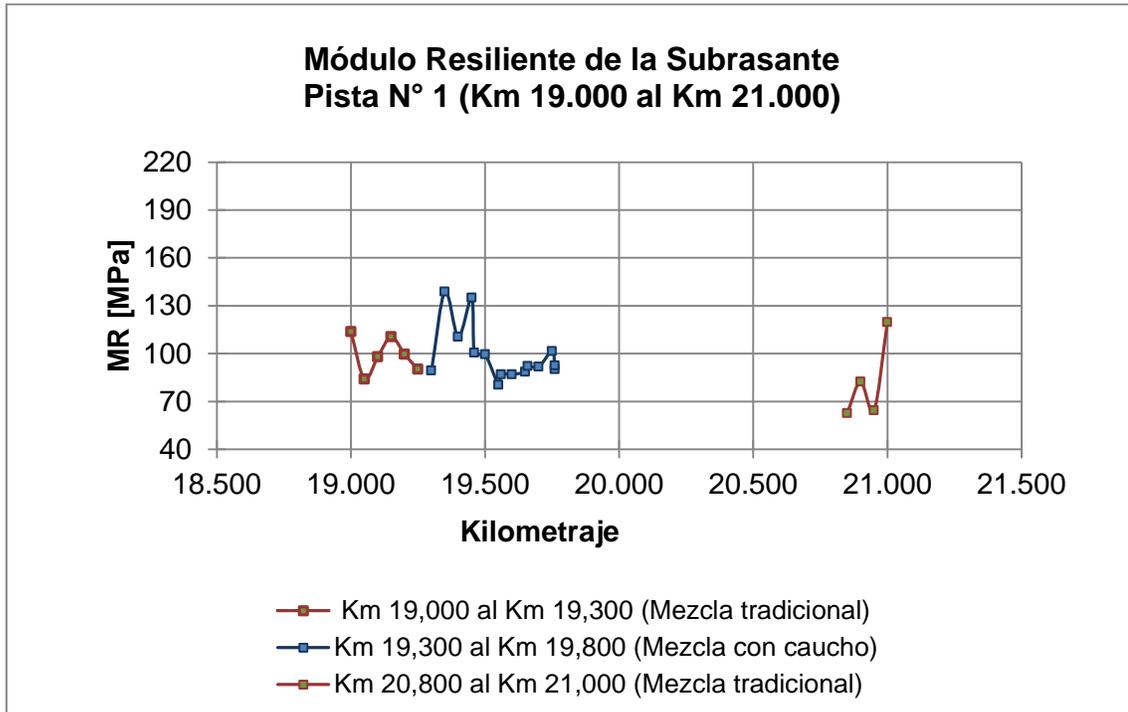


Figura 4-55. Módulo resiliente de la subrasante, pista N° 1 (7.05.2013).

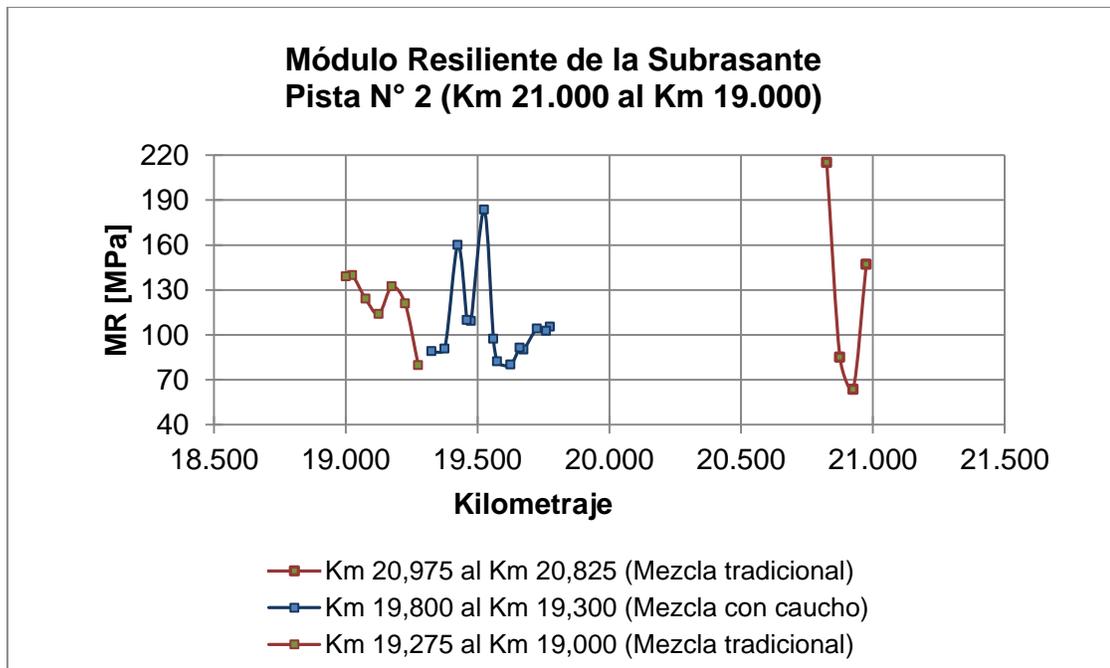


Figura 4-56. Módulo resiliente de la subrasante, pista N° 2 (7.05.2013).

- Número Estructural efectivo: Pista N° 1 y Pista N° 2.

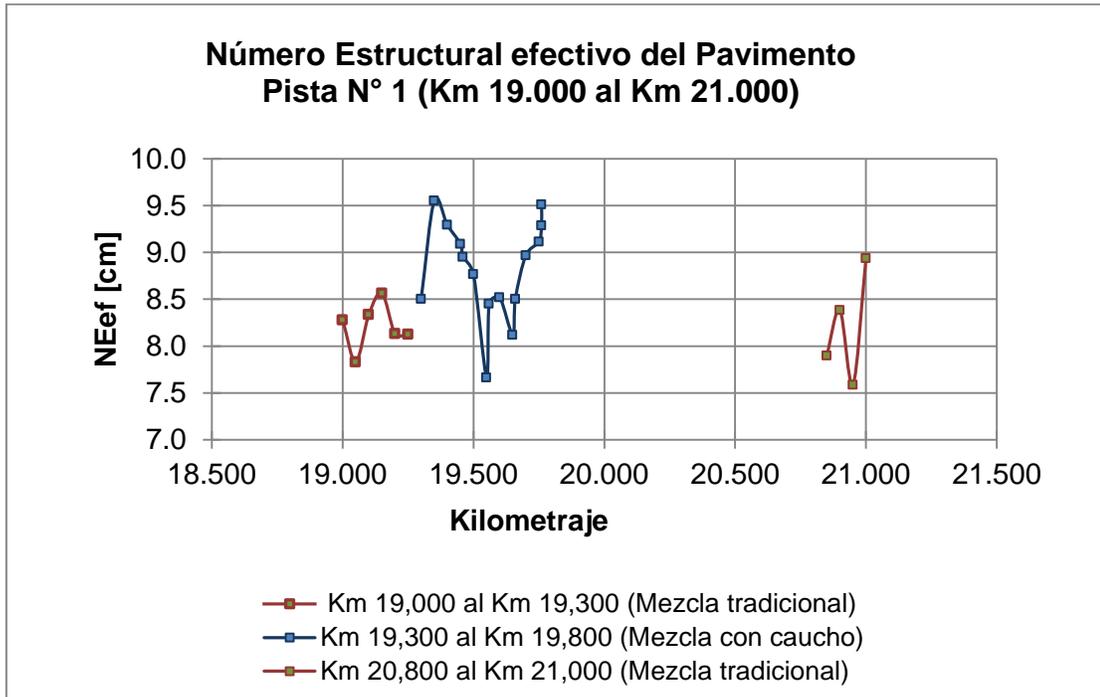


Figura 4-57. Número Estructural efectivo del pavimento, pista N° 1 (7.05.2013).

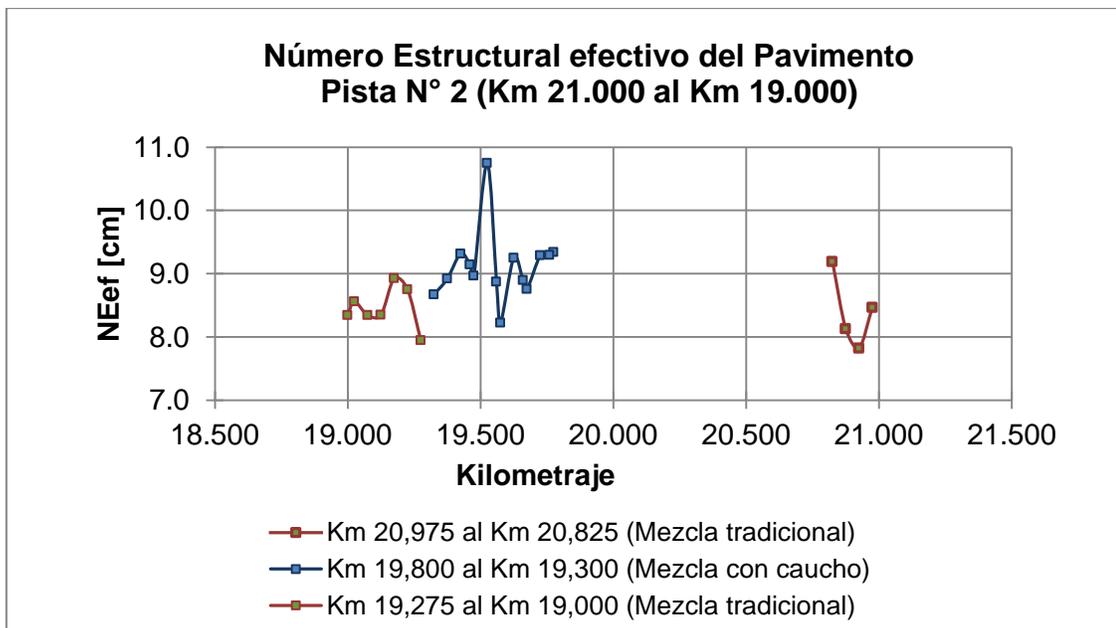


Figura 4-58. Número Estructural efectivo del pavimento, pista N° 2 (7.05.2013).

Los valores promedios para cada uno de los parámetros anteriormente señalados, se señalan a continuación, por pista:

Tabla 4-102. Valores promedios de la deflectometría de impacto, pista N° 1.

Tipo de mezcla asfáltica	Pista N° 1	DMX	MR	NEef
		[μ m]	[MPa]	[cm]
Mezcla tradicional	Km 19.000 al Km 19.300	520	90	8.2
Mezcla con polvo de caucho	Km 19.300 al Km 19.800	467	99	8.8
Mezcla tradicional	Km 20.800 al Km 21.000	584	82	8.2

Tabla 4-103. Valores promedios de la deflectometría de impacto, pista N° 2.

Tipo de mezcla asfáltica	Pista N° 2	DMX	MR	NEef
		[μ m]	[MPa]	[cm]
Mezcla tradicional	Km 21.000 al Km 20.800	478	128	8.4
Mezcla con polvo de caucho	Km 19.800 al Km 19.300	432	107	9.1
Mezcla tradicional	Km 19.300 al Km 19.000	459	121	8.5

Los valores de los módulos de subrasante en promedio determinan un suelo homogéneo a lo largo de los tramos representativos de cada tipo de mezcla asfáltica (tradicional y modificada con polvo de caucho); sin embargo, se observa un aumento de la capacidad de soporte en la pista N° 2 en relación a la pista N° 1.

Respecto a la condición estructural de los pavimentos debido al cambio en el tipo de mezcla asfáltica utilizada en la capa de rodadura, se pueden identificar diferencias en la capacidad estructural de los pavimentos (variaciones de aproximadamente 5cm en el valor del NEef, en ambas pistas). Además, en términos comparativos, se pudo visualizar claramente que el pavimento en el Tramo de Prueba presenta una mejor condición estructural que el tramo con mezcla asfáltica tradicional. En efecto, la capacidad estructural en el Tramo Experimental, que es regular en ambas pistas (NEef promedio de 8.8cm en la pista N° 1 y 9.1cm en la N° 2), es mayor en comparación al tramo con la mezcla asfáltica convencional, que también presenta una condición homogénea (NEef promedio de 8.2cm en la pista N° 1 y 8.4cm en la N° 2).

De esta manera, para los pavimentos de los tramos confeccionados con distintas mezclas asfálticas en rodadura (igual estructuración), se obtiene que:

$$NEef_{\text{Mezcla asfáltica tradicional}} < NEef_{\text{Tramo de Prueba}}$$

A modo de información complementaria, se presenta en la Tabla 4-104, el resultado del Número Estructural total requerido (NE requerido) a nivel de subrasante, calculado de acuerdo a las solicitudes de tránsito acumuladas estimadas para la vida

de diseño (20 años)¹² y a la condición del suelo de fundación, definida por el Estudio de Mecánica de Suelos (76MPa). Este valor, determinado en el Estudio de Ingeniería, se calcula en la etapa del diseño estructural del pavimento, según el procedimiento de cálculo descrito en el numeral 3.604.1 del Volumen N° 3 del Manual de Carreteras (método de diseño de pavimentos flexibles nuevos).

Tabla 4-104. Número Estructural de diseño requerido.

Pavimento	NE requerido [cm]
Total nivel subrasante	8.2

Se debe verificar que (a nivel de subrasante):

$$N.E_T \text{ requerido} \leq N.E_f \text{ terreno (condición real de la estructural del pavimento)}$$

Al comparar los valores de los números estructurales promedios de terreno (Tabla 4-102 y Tabla 4-103) con respecto al valor del número estructural requerido (demandado), solo se valida la exigencia anterior en el Tramo de Prueba, donde el valor representativo de terreno supera notablemente el valor requerido, a diferencia del tramo confeccionado con la mezcla asfáltica tradicional, cuyo valor medio de terreno es muy cercano al valor demandado. De esta manera, se espera que el pavimento del Tramo de Prueba sea más durable (vida de servicio más prolongada) que el pavimento confeccionado con la mezcla asfáltica tradicional en su capa de rodadura.

4.2.4.2.3. Control de la Rugosidad (IRI)

La determinación de la rugosidad superficial de los pavimentos asfálticos (expresada mediante el indicador IRI) se realiza por el método de perfilometría longitudinal, cuyo procedimiento se encuentra descrito en 8.502.8 del M.C.-V.8. Para fines comparativos, las mediciones se ejecutan tanto en el Tramo de Prueba (Km 19.300 al Km 19.800) como también en un sector confeccionado con la mezcla asfáltica tradicional en la capa de rodadura (Km 20.800 al Km 21.500). Estas se efectúan el 22.04.2013, aproximadamente cinco meses después de dado el tránsito.

Las mediciones del IRI se llevan a cabo mediante el perfilómetro laser MLP, perteneciente al LNV. En los siguientes gráficos (Figura 4-59 y Figura 4-60), se entregan los resultados obtenidos cada 50m en ambas pistas.

¹² La cantidad de ejes equivalentes de 80kN acumulados para los 20 años de servicio se estimó en $EE=9.249.468$, tras el Estudio de Tránsito.

- Pista N° 1

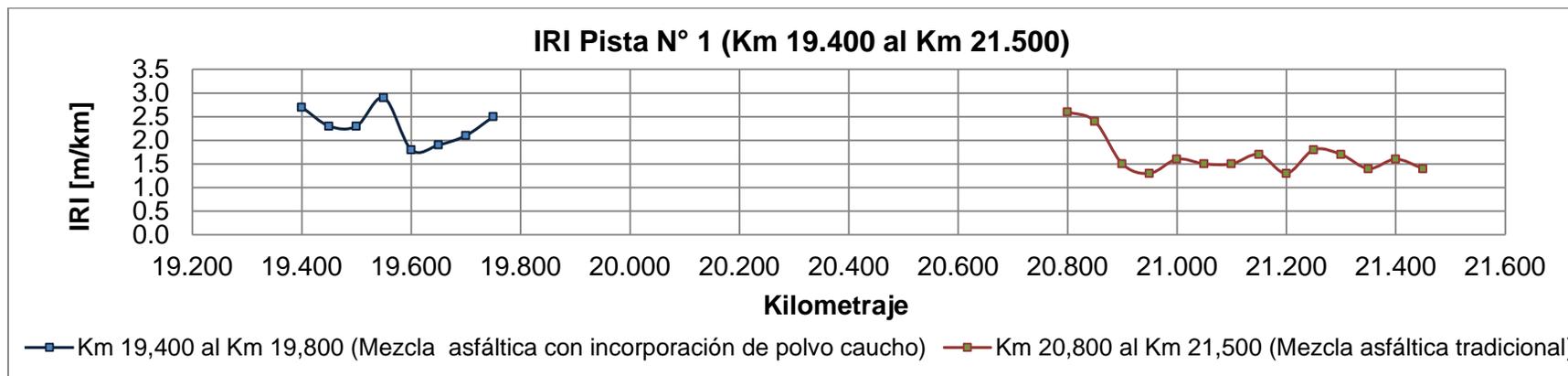


Figura 4-59. IRI, pista N° 1 (22.04.2013).

- Pista N° 2

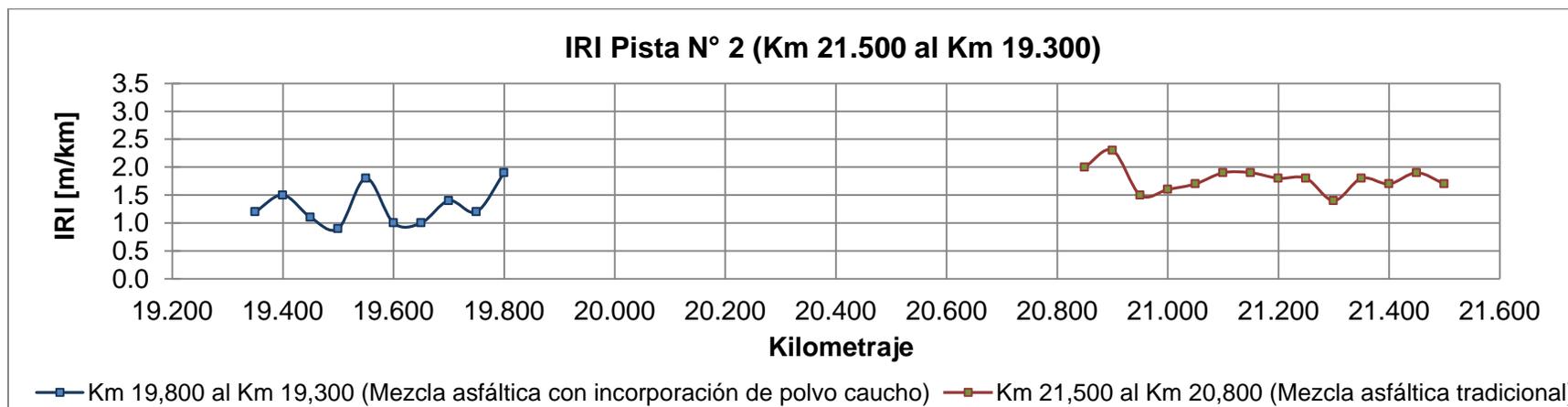


Figura 4-60. IRI, pista N° 2 (22.04.2013).

De los gráficos, se observa que los valores del IRI representativos del Tramo de Prueba, fluctúan entre 1.5 y 3.0m/km en la pista N° 1 y entre 1.0 y 2.0m/km en la pista N° 2, mientras que en el tramo correspondiente a la mezcla asfáltica tradicional, los resultados obtenidos quedan comprendidos entre 1.0 y 2.5m/km en la pista N° 1 y entre 1.5 y 2.5m/km en la pista N° 2.

En general, no se presentan grandes variaciones de las medidas dentro de ninguno de los dos tramos. Esta mayor uniformidad de los resultados, se atribuye principalmente a que el proceso de construcción, específicamente la compactación, se realizó de manera adecuada y a una mayor temperatura. Con esto se evitó el prematuro deterioro superficial y la aparición de defectos en los pavimentos, que pueden afectar el perfil.

Según lo estipulado en el procedimiento de evaluación de la rugosidad para las mezclas asfálticas convencionales descrito 5.408.304(5) del M.C-V.5, un pavimento nuevo tiene una rugosidad aceptable, si todos los promedios de cinco tramos consecutivos de 200m o fracción (media fija), tienen un valor de IRI igual o inferior a 2.0m/km y ninguno de los valores individuales supera 2.8m/km.

A continuación, para la evaluación del IRI, se procesa la información cada 200m o fracción y por medias fijas, en cada una de las pistas:

Tabla 4-105. Control del IRI, pista N° 1.

Km	Km	Long. Tramo [km]	IRI Pista N° 1 [m/km]		Tipo de mezcla asfáltica
			Evaluación Individual	Evaluación Media Fija	
19.400	19.600	0.200	2.6	2.4	Mezcla con polvo de caucho
19.600	19.800	0.200	2.1		
20.800	21.000	0.200	2.0	1.7	Mezcla tradicional
21.000	21.200	0.200	1.6		
21.200	21.400	0.200	1.6		
21.400	21.500	0.100	1.5		

Tabla 4-106. Control del IRI, pista N° 2.

Km	Km	Long. Tramo [km]	IRI Pista N° 2 [m/km]		Tipo de mezcla asfáltica
			Evaluación Individual	Evaluación Media Fija	
21.500	21.400	0.100	1.8	1.8	Mezcla tradicional
21.400	21.200	0.200	1.7		
21.200	21.000	0.200	1.8		
21.000	20.800	0.200	1.9		
19.800	19.600	0.200	1.4	1.3	Mezcla con polvo de caucho
19.600	19.400	0.200	1.2		
19.400	19.300	0.100	1.4		

De los valores obtenidos, la mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho (Tramo de Prueba) cumple los requisitos exigidos por muestra individual en ambas pistas, no así por media fija, dado que en la pista N° 1 se supera el umbral mínimo estipulado de 2.0m/km. Por otro lado, la mezcla asfáltica tradicional verifica el control de la rugosidad, tanto por valor individual como por media fija.

Los resultados de la evaluación no son concluyentes, dado que al comparar ambos tipos de mezclas asfálticas, se tienen que en la pista N° 1 son notorios los mayores valores del IRI en el Tramo de Prueba respecto al tramo confeccionado con la mezcla asfáltica tradicional, tanto por valor individual como por media fija. Sin embargo, en la pista N° 2 se invierte la situación, y los resultados en el Tramo de Prueba son bastante inferiores, en términos relativos y generales. En efecto, las medidas de rugosidad en el pavimento asfáltico tradicional son uniformes entre una pista y otra y promedian 1.8m/km, pero en el Tramo de Prueba, el valor medio en la pista N° 1 es de 2.4m/km y en la pista N° 2 es de 1.3m/km.

4.2.4.2.4. Control del Coeficiente de fricción transversal (SCRIM)

Las mediciones del Coeficiente de Fricción transversal con el SCRIM (LNV) según el método descrito en 8.602.17 del M.C-V.8, se efectúan el 22.05.2013, aproximadamente seis meses después del término de la construcción del Tramo de Prueba. Para fines comparativos, estas se realizan en forma continua en ambas pistas, tanto en el Tramo de Prueba, como en dos sectores del Contrato confeccionados con la mezcla asfáltica tradicional (Km 19.000 al Km 19.300 y Km 20.800 al Km 21.000).

En la Figura 4-61 y la Figura 4-62, se entregan los resultados de las mediciones correspondientes a la pista N° 1 y a la pista N° 2, procesados cada 20m.

En las figuras se observan diferencias importantes entre los valores obtenidos en los tramos representativos de cada tipo de mezcla asfáltica. En el Tramo de Prueba, los valores fluctúan en el rango 0.60 a 0.80SFC en la pista N° 1 y entre 0.75 a 0.90SFC en la pista N° 2; los resultados del pavimento confeccionado con la mezcla asfáltica tradicional fluctúan en el rango 0.60 a 0.85SFC en la pista N° 1 y entre 0.65 a 0.80SFC en la pista N° 2.

Es de importancia notar que los sectores de bajos valores de fricción, se dan particularmente en las zonas de las juntas transversales, donde se produce el cambio en el tipo de mezcla asfáltica utilizada en la capa de rodadura. Estas son zonas que exigen una mayor cantidad de pasadas de rodillo para lograr que la superficie quede lo más pareja y continua posible, y no se note el cambio entre los pavimentos adyacentes. Sin embargo, este exceso de rodillado, que disminuye significativamente el contenido de huecos en la capa asfáltica, puede provocar afloramientos de asfalto en la superficie, lo cual disminuye la fricción del neumático con este.

A continuación, para la evaluación del coeficiente de fricción según el procedimiento para mezclas asfálticas convencionales descrito en 5.408.303(3)b) del M.C.-V.5, se procesa la información cada 200m o fracción, en cada pista:

Tabla 4-107. Control del coeficiente de fricción transversal (SCRIM), pista N° 1.

Km	Km	Long. Tramo [km]	Coeficiente Fricción [SFC]	Tipo de mezcla asfáltica
19.000	19.200	0.200	0.77	Mezcla tradicional
19.200	19.300	0.100	0.65 (*)	
19.300	19.400	0.100	0.67 (*)	Mezcla con polvo de caucho
19.400	19.600	0.200	0.72	
19.600	19.800	0.200	0.76	
20.800	21.000	0.200	0.70	Mezcla tradicional

Tabla 4-108. Control del coeficiente de fricción transversal (SCRIM), pista N° 2.

Km	Km	Long. Tramo [km]	Coeficiente Fricción [SFC]	Tipo de mezcla asfáltica
21.000	20.800	0.200	0.75	Mezcla tradicional
19.800	19.600	0.200	0.81	Mezcla con polvo de caucho
19.600	19.400	0.200	0.83	
19.400	19.300	0.100	0.81	
19.300	19.200	0.100	0.72	Mezcla tradicional
19.200	19.000	0.200	0.74	

Respecto al control receptivo, los valores obtenidos del coeficiente de fricción en el Tramo de Prueba, en ambas pistas, cumplen el mínimo exigido de 0.4SFC a lo largo de toda la superficie medida, de igual manera sucede con el tramo con mezcla asfáltica tradicional.

Por otro lado, en términos comparativos, los valores obtenidos en el Tramo de Prueba son mayores que los del pavimento convencional, siendo sus valores promedios característicos de 0.74SFC en la pista N° 1 y de 0.82SFC en la pista N° 2, a diferencia del tramo con mezcla tradicional, cuyo valor promedio representativo es de 0.74SFC en ambas pistas. Se debe recalcar que no se consideraron para este efecto los valores de 0.67SFC y de 0.65SFC (*) en la zona de la junta transversal de la pista N° 1, pues no representan las características reales de los respectivos pavimentos.

De esta manera, el pavimento confeccionado con la mezcla con incorporación de polvo de caucho parece proveer una superficie con mejores características de resistencia al deslizamiento (mayor adherencia entre el neumático y el pavimento) en comparación a uno confeccionado con mezcla asfáltica convencional, lo cual es sumamente importante para la seguridad de los usuarios especialmente en situación de frenado y curvas con pavimento mojado.

4.2.4.2.5. Control del Coeficiente de fricción (péndulo TRRL)

Se controla también el coeficiente de fricción en condición húmeda con el Péndulo Británico TRRL, cuyo procedimiento de ensayo y evaluación esta normado en 8.502.16 del M.C.-V.8. Las mediciones se realizan en forma puntual en ambas pistas; el 22.04.2013 en la Pista N° 1 y el 23.04.2013 en la Pista N° 2, aproximadamente cinco meses después del término de la construcción del Tramo de Prueba.

Para fines comparativos, estas se efectúan tanto en el Tramo de Prueba (Km 19.300 a Km 19.800), a intervalos de 100m (cada medida es representativa de 100m), como en un sector del Contrato con la mezcla asfáltica tradicional (se realiza una sola medida en el Km 20.950, representativa del subtramo entre el Km 20.900 y el Km 21.000). El ensayo se ejecuta en la huella externa, en los mismos puntos donde se extrajeron los testigos.

El resultado de la medición entrega el valor BPN (British Pendulum Number), sin embargo, la medida se debe informar en forma de Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento ($CRD = BPN/100$).

Los resultados CRD obtenidos, son los siguientes:

- **Pista N° 1**

Tabla 4-109. Control del coeficiente de resistencia al deslizamiento (péndulo TRRL), pista N° 1.

Km	Huella	CRD (BPN/100)	Tipo de mezcla asfáltica
19.460	Externa	0.71	Mezcla con polvo de caucho
19.560	Externa	0.66	
19.660	Externa	0.55	
19.760	Externa	0.67	
20.950	Externa	0.56	Mezcla tradicional

- **Pista N° 2**

Tabla 4-110. Control del coeficiente de resistencia al deslizamiento (péndulo TRRL), pista N° 2.

Km	Huella	CRD (BPN/100)	Tipo de mezcla asfáltica
20.950	Externa	0.67	Mezcla tradicional
19.760	Externa	0.60	Mezcla con polvo de caucho
19.660	Externa	0.55	
19.560	Externa	0.64	
19.460	Externa	0.59	

La evaluación de la resistencia al deslizamiento en la superficie del Tramo de Prueba se realiza según el procedimiento para mezclas asfálticas convencionales descrito en 5.408.303(3)b) del M.C.-V.5, en que cada medida es representativa de 100m. La normativa exige un valor BPN mínimo de 55, equivalente a un valor CRD de 0.55.

Los valores obtenidos en ambas pistas del Tramo de Prueba superan el mínimo exigido, de igual manera que el pavimento con la mezcla asfáltica patrón, donde también se verifica la exigencia en ambas pistas.

A diferencia de los resultados determinados con el SCRIM, con el péndulo TRRL se presentan mejores resultados para el coeficiente de fricción en la pista N° 1 del Tramo de Prueba en comparación a la pista N° 2 (CRD promedio de 0.65 versus 0.60, respectivamente). Una situación similar sucede al comparar los resultados del Tramo de Prueba con los del tramo con mezcla asfáltica tradicional en la pista N° 2. Respecto a este hecho, es importante tener en cuenta que las mediciones con el péndulo son discretas, lo que imposibilita caracterizar completamente el pavimento en toda su

extensión como el SCRIM, además dado que solo se realizaron dos medidas en el sector con mezcla asfáltica tradicional, uno por pista, los valores obtenidos no son concluyentes.

4.2.4.2.6. Control de la Macrotextura por ensaye del círculo de arena

Las mediciones de la macrotextura en la superficie del pavimento por el método del círculo de arena (8.602.25 del M.C.-V.8), se llevan a cabo el 22.04.2013 en la pista N° 1 y el 23.04.2013 en la pista N° 2, aproximadamente cinco meses después del término de la construcción del Tramo de Prueba. Para fines comparativos, estas se realizan tanto en el Tramo de Prueba (Km 19.300 a Km 19.800), a intervalos de 100m (cada medida es representativa de 100m), como en un sector del Contrato con la mezcla asfáltica tradicional (se toma una sola medida en el Km 20.950 que es representativa del subtramo entre el Km 20.900 a Km 21.000).

El ensayo se efectúa en forma puntual con un volumen de arena de 25cc (equipo de ensayo perteneciente al LNV) en la huella externa de cada pista y en los mismos kilometrajes donde se extrajeron los testigos.

Los resultados de macrotextura (MTD) se muestran en la Tabla 4-111 (pista N° 1) y en la Tabla 4-112 (pista N° 2).

Los valores de macrotextura en el Tramo de Prueba resultan menores que en el tramo con la mezcla asfáltica tradicional. En efecto, en la pista N° 1, los resultados en el tramo experimental son variables y fluctúan en el rango 0.3 a 0.6mm, versus el valor de 0.6mm en el sector de la mezcla asfáltica tradicional, y en la pista N° 2, los valores en el tramo de prueba son más parejos y se encuentran en el rango 0.3 a 0.4mm, mientras que en el sector de la mezcla asfáltica tradicional, el valor obtenido es de 0.4mm.

- **Pista N° 1**

Tabla 4-111. Control de la macrotextura (método de círculo de arena), pista N° 1.

Km	Huella	MTD [mm]	Tipo de Mezcla
19.460	Externa	0.6	Mezcla asfáltica con polvo de caucho
19.560	Externa	0.5	
19.660	Externa	0.4	
19.760	Externa	0.3	
20.950	Externa	0.6	Mezcla asfáltica tradicional

- **Pista N° 2**

Tabla 4-112. Control de la macrotextura (método de círculo de arena), pista N° 2.

Km	Huella	MTD [mm]	Tipo de Mezcla
20.950	Externa	0.4	Mezcla asfáltica tradicional
19.760	Externa	0.3	Mezcla asfáltica con polvo de caucho
19.660	Externa	0.3	
19.560	Externa	0.4	
19.460	Externa	0.4	

Con respecto a la evaluación de la macrotextura superficial, esta se realiza según el procedimiento para mezclas asfálticas convencionales descrito en 5.408.303(3)a) del M.C.-V.5. La normativa exige un mínimo de macrotextura de 0.6mm.

Los valores obtenidos en ambas pistas del Tramo de Prueba, no logran cumplir el mínimo exigido, excepto en el sector representativo del Km 19.460 en la pista N° 1. Los bajos valores obtenidos, pueden ser atribuidos al bajo contenido de huecos en el Tramo de Prueba tras la compactación.

4.2.5. Resumen

En relación a las especificaciones nacionales para mezclas asfálticas en caliente convencionales, descritas en la Sección 5.408 del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras, se obtuvieron los siguientes resultados en el Tramo de Prueba:

Tabla 4-113. Resultados de los controles receptivos en el Tramo de Prueba, Contrato Mejoramiento Ruta F-50.

Control Receptivo			Especificación M.C. – V. 5		Tramo de Prueba	
Condición	Estructural	Contenido de asfalto	5.408.304 (3)	Pb ± 0.3%	Se verifica con el factor de corrección por agregado	
		Espesor	5.408.304 (2)	≥ e _c	Cumple	
		Compactación	5.408.304 (1)	≥ 97%	Cumple en promedio (área representativa de 425m)	
	Funcional	Rugosidad (IRI)	Individual	5.408.304 (5)	2.8	Cumple
			Media fija		2.0	Cumple sólo en pista N° 2
		Resistencia al Deslizamiento	SCRIM	5.408.303 (3) b)	≥ 0.4SFC	Cumple
			Péndulo TRRL		≥ 0.55 (BPN)	Cumple
Macrotextura	Círculo de Arena	5.408.303 (3) a)	≥ 0.6mm	No cumple		

CAPÍTULO 5 ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO

En el Capítulo anterior, a partir de un trabajo a nivel de Laboratorio, se caracterizaron las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho de NFU por vía seca, utilizadas en los Tramos de Prueba (digestión de 2 horas a 170°C), y, comparando su comportamiento mecánico con el de las mezclas asfálticas tradicionales, se validaron sus diseños.

En este Capítulo, a modo de complementar la información anterior, se estudia en Laboratorio el efecto de la disminución del tiempo de digestión en el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas modificadas con el polímero reciclado. Para esto, utilizando la dosificación de la mezcla asfáltica modificada del segundo Tramo de Prueba pero reduciendo el tiempo de digestión a la mitad, se caracteriza una mezcla asfáltica confeccionada con una hora de digestión, según las siguientes propiedades:

- Estabilidad Marshall.
- Resistencia a tracción indirecta.
- Módulo resiliente.
- Resistencia a la deformación plástica y susceptibilidad a la humedad (ensayo de Hamburgo).

Los resultados a obtener permiten comparar esta mezcla asfáltica modificada, según su comportamiento mecánico, con la mezcla modificada confeccionada con dos horas de digestión y con la mezcla asfáltica tradicional (sin incorporación de polvo de caucho), cuyos resultados ya están disponibles, y validar así su diseño. Con esta información se espera generar las bases para futuros tramos de prueba a realizarse por parte de la Dirección de Vialidad, con menores tiempos de digestión.

Se debe tener en cuenta que los tiempos que transcurren desde que la mezcla es cargada en los camiones en la Planta Asfáltica hasta que es colocada en terreno son menores a una hora, ya que generalmente la Planta se instala en sectores aledaños a la Obra. El considerar tiempos de digestión mayores en esos casos (determinados en Laboratorio), implicaría tiempos de espera en que los camiones que transportan las mezclas asfálticas modificadas estarían detenidos para que estas concluyan su proceso de digestión en ellos y, en consecuencia, se produciría un encarecimiento de los trabajos de construcción (por la mayor cantidad de camiones a utilizar, considerando que la fabricación y colocación de la mezcla en terreno se realiza de manera continua).

Para concluir el presente Capítulo, se comparan los resultados obtenidos en este trabajo con los conseguidos en estudios anteriores, realizados en el Laboratorio Nacional de Vialidad.

5.1. Efecto de la disminución del tiempo de digestión

5.1.1. Información de diseño de mezclas asfálticas en estudio

En la Tabla 5-1, se presentan las condiciones de digestión o mezclado, según corresponda, de las mezclas asfálticas a estudiar. Con el objetivo de facilitar la lectura, se repiten algunos de los resultados obtenidos en el Capítulo 4, para la mezcla asfáltica modificada con dos horas de digestión (segundo Tramo de Prueba) y la mezcla asfáltica tradicional.

Como ya se señaló, se caracterizan dos tipos de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho, una con dos horas de digestión, denominada “Con Caucho-2 (2hrs.)”, y otra con una hora de digestión, denominada “Con Caucho-2 (1hr.)”. La mezcla asfáltica sin incorporación de polvo de caucho (tradicional) se designa “Sin Caucho-2”.

Se debe tener en cuenta, que solo se pretende estudiar el efecto del polvo de caucho y el del tiempo de digestión en las propiedades analizadas, de manera que las mezclas asfálticas, se dosifican con el mismo contenido de ligante, de 5.4% respecto al peso del agregado, que en el caso de la mezcla asfáltica sin incorporación de polvo de caucho, no corresponde a su óptimo (la mezcla asfáltica original tiene un óptimo de 5.1% respecto al peso del agregado).

Tabla 5-1. Condiciones de mezclado/digestión y compactación.

Tipo de mezclas asfálticas		Sin Caucho-2	Caucho-2 (1hr.)	Caucho-2 (2hrs)
Contenido de Asfalto	% r.a.	5.4		
Contenido de Caucho	% r.a.	0	0.5	0.5
Tiempo Digestión	horas	-	1	2
Temperatura Mezclado/Digestión	°C	160	170	170
Temperatura Compactación	°C	145	160	160

En la Tabla 5-2, para los distintos tipos de mezclas asfálticas en estudio, se presentan los resultados obtenidos para las resistencias a tracción indirecta (ITS) de las probetas acondicionadas en seco y en húmedo (UNE-EN 12697-23) y la resistencia

conservada por tracción indirecta (ITSR) respectiva (UNE-EN 12697-12). Los parámetros se obtienen a partir de probetas cilíndricas tipo Marshall, compactadas con 50 golpes por cara y ensayadas a 15°C.

Tabla 5-2. Resistencia Conservada por tracción indirecta a 15°C.

Tipos de mezclas asfálticas	ITS [MPa]		ITSR [%]
	Probetas Secas	Probetas Húmedas	
Sin Caucho-2	1.44	1.39	97
Caucho-2 (1hr)	2.03	2.08	103
Caucho-2 (2hrs)	1.71	1.68	98

De acuerdo con la Tabla 5-2, se observa que todas las mezclas asfálticas verifican la exigencia mínima de resistencia conservada de 85% (a 15°C) para capas de rodadura (Orden Circular 24/2008: PG-3, Artículo 542).

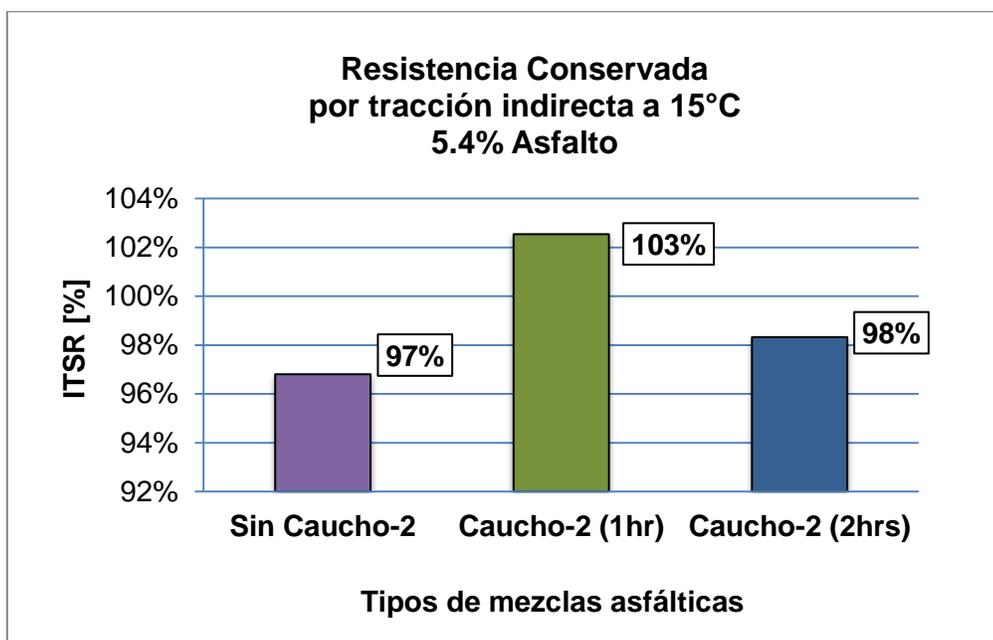


Figura 5-1. Resistencia Conservada por tracción indirecta a 15°C.

En la Tabla 5-3, se presentan los resultados del análisis Marshall (8.302.47 del M.C.-V.8). Los parámetros se obtienen de una serie de tres probetas de tipo Marshall, confeccionadas según el procedimiento descrito en 8.302.40 del M.C.-V.8.

Tabla 5-3. Parámetros Marshall y control de calidad.

Tipo de mezclas asfálticas		Sin Caucho-2	Caucho-2 (1hr.)	Caucho-2 (2hrs)	Control Calidad
Densidad Marshall	kg/m ³	2353	2354	2325	
Densidad máxima de mezcla (DMM)	kg/m ³	2481	2452	2460	
Estabilidad	N	10669	15310	15104	> 9000
Fluidez	0.25mm	16	16	16	8 – 16
Huecos en la Mezcla, Va	%	5.2	4.0	5.5	4 – 6
Vacios en el agregado mineral, VAM	%	15.7	15.7	16.7	> 14
Huecos llenos con asfalto, Vb	%	67	74	67	

De acuerdo con la Tabla 5-3, se observa que todas las mezclas asfálticas verifican las especificaciones del Manual de Carreteras para mezclas asfálticas en caliente convencionales (5.408.203 del M.C-V.5).

5.1.2. Propiedades mecánicas

Los distintos tipos de mezclas asfálticas en estudio, se comparan según los siguientes ensayos mecánicos:

- Estabilidad Marshall (8.302.40 del M.C.-V.8).
- Módulo resiliente a 15° y 25°C (UNE-EN 12697-26).
- Sensibilidad al agua y Resistencia a la tracción indirecta a 15°C (UNE-EN 12697-23 y UNE-EN 12697-12).
- Ahuellamiento bajo agua a 50°C con Equipo de Hamburgo (AASHTO 324-04).

5.1.2.1. Estabilidad Marshall

En la Tabla 5-4, se resumen los resultados de las estabildades según el Ensaye Marshall (Tabla 5-3), obtenidas para los distintos tipos de mezclas asfálticas. Se incluye además, la variación de la estabilidad por el efecto de la incorporación de polvo de caucho y del tiempo de digestión, tomando la mezcla asfáltica tradicional como patrón de comparación (Δ Estabilidad / Estabilidad_{Sin Caucho-2}).

Tabla 5-4. Efecto del polvo de caucho y el tiempo de digestión en la estabilidad.

Tipos de mezclas asfálticas	Estabilidad [N]	Variación Estabilidad [%]
Sin Caucho-2	10669	0
Caucho-2 (1hr)	15310	43
Caucho-2 (2hrs)	15104	42

Se observa que las mezclas asfálticas modificadas por vía seca poseen mayores valores de estabilidad que la mezcla asfáltica convencional. Esto se debe a que la incorporación de polvo de caucho, al aumentar la viscosidad del cemento asfáltico, mejora la cohesión y, en consecuencia, la estabilidad de las mezclas asfálticas.

Por otro lado, de los resultados obtenidos, no es posible identificar el efecto del tiempo de digestión en la cohesión de las mezclas asfálticas evaluadas (medida por medio de la Estabilidad), a pesar de que lo esperable es un aumento en este parámetro a mayor tiempo de digestión (la viscosidad del ligante aumenta proporcionalmente con el tiempo de digestión).

En general, los valores altos de estabilidad (sobre los 14000N) se asocian en terreno a mezclas de comportamiento frágil, sin embargo, en este caso, el incorporar mayores contenidos de asfalto en las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho (5.4% r.a.), respecto de la mezcla asfáltica original (cuyo óptimo es de 5.1%r.a.), disminuiría este efecto negativo. Los altos valores de fluidez conseguidos en estos casos (Tabla 5-3), son un indicio de los altos valores de deformación plástica sufrida antes de la falla en el ensayo Marshall.

5.1.2.2. Módulo Resiliente a 15°C y 25°C

La caracterización de la rigidez de los distintos tipos de mezclas asfálticas a 15°C y 25°C, se realiza mediante el ensayo de tracción indirecta (UNE-EN 12697-26:2006, anexo C). Este se efectúa sobre tres probetas cilíndricas de tipo Marshall compactadas con 75 golpes por cara.

En la Tabla 5-5, se muestran los resultados obtenidos para los módulos resilientes (MR) a 15°C y 25°C, el efecto de la incorporación de polvo de caucho y del tiempo de digestión en la rigidez tomando la mezcla asfáltica tradicional como patrón de comparación ($\Delta MR / MR_{Sin\ Caucho-2}$) y la susceptibilidad térmica obtenida a partir de la variación de este parámetro con la temperatura ($\Delta MR_{T^{\circ}} / MR_{15^{\circ}C}$).

Tabla 5-5. Efecto del polvo de caucho y el tiempo de digestión en la rigidez.

Tipos de mezclas asfálticas	MR [MPa]		Variación MR [%]		Sensibilidad a T° [%]
	15°C	25°C	15°C	25°C	
Sin Caucho-2	5410	1859	0	0	66
Caucho-2 (1hr)	7174	2845	33	53	60
Caucho-2 (2hrs)	8267	4023	53	116	51

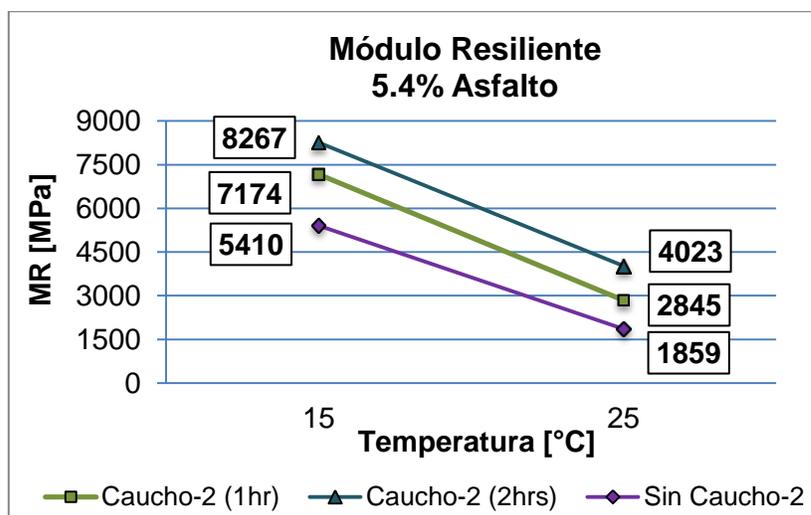


Figura 5-2. Efecto del polvo de caucho y el tiempo de digestión en la rigidez.

De la Tabla 5-5, se observa que los valores de los módulos resilientes de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho son considerablemente mayores a los de la mezcla asfáltica convencional, para ambas temperaturas, siendo el incremento de la rigidez de las mezclas modificadas, respecto al patrón, superior a mayor temperatura (25°C), y más notorio para el periodo de digestión más prolongado (dos horas).

Con respecto a la susceptibilidad térmica, los resultados obtenidos indican que las mezclas asfálticas con adición de polvo de caucho, son menos sensibles a la temperatura que la mezcla asfáltica convencional. Se observa en las mezclas asfálticas modificadas, que la susceptibilidad disminuye con el incremento en el tiempo de digestión.

Debido a que los módulos resilientes de las mezclas asfálticas modificadas resultan altos, lo que está asociado a pavimentos rígidos con fallas frágiles bajo cargas repetidas, es recomendable complementar este ensayo con un estudio de resistencia a la fatiga. Sin embargo, debido a las mayores dotaciones de asfalto que permiten estas mezclas (respecto de las mezclas asfálticas convencionales), es esperable un buen comportamiento ante esa falla (a mayor contenidos de asfalto las mezclas asfálticas se tornan más flexibles).

5.1.2.3. Sensibilidad al agua y Resistencia a Tracción indirecta a 15°C

En la Figura 5-3 se presentan, para los distintos tipos de mezclas asfálticas, los resultados de las resistencias a tracción indirecta a 15°C (ITS), tanto de las probetas acondicionadas en húmedo como en seco, obtenidos previamente del ensayo para la determinación de la resistencia conservada (Tabla 5-2).

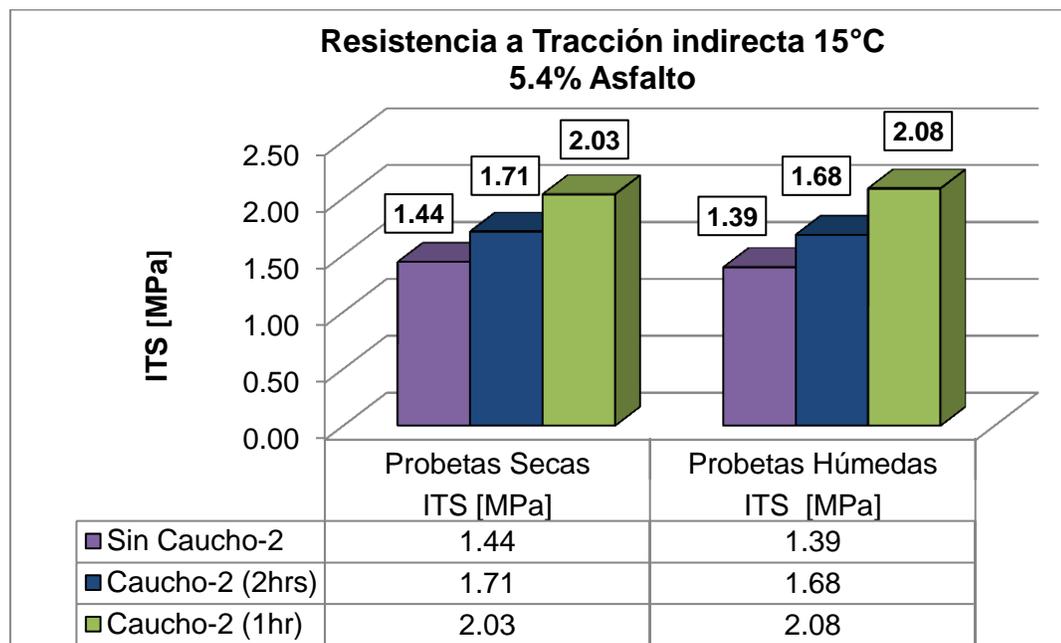


Figura 5-3. Efecto de la incorporación de polvo de caucho y el tiempo de digestión en la resistencia a la tracción.

De los figuras, se observa que los valores de la resistencia a tracción indirecta de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho, tanto para las probetas acondicionadas en húmedo como en seco, son superiores a los de la mezcla asfáltica convencional. Sin embargo, en las mezclas asfálticas modificadas, se observa que menores tiempos de digestión favorecen esta propiedad.

Para complementar la información anterior, para el caso de las probetas acondicionadas en seco, se presenta en la Tabla 5-6 el valor del incremento porcentual de la resistencia a tracción indirecta para cada una de las mezclas asfálticas modificadas, tomando como patrón de comparación la resistencia de la mezcla asfáltica sin incorporación de polvo de caucho ($\Delta ITS / ITS_{\text{Sin Caucho-2}}$).

Tabla 5-6. Efecto de la incorporación de polvo de caucho y el tiempo de digestión en la resistencia a la tracción (probetas secas).

Tipos de mezclas asfálticas	ITS [MPa]	Variación ITS [%]
Sin Caucho-2	1.44	0
Caucho-2 (1hr)	2.03	41
Caucho-2 (2hrs)	1.71	19

Los resultados de la Tabla 5-6, indican que la mezcla asfáltica modificada sometida a una hora de digestión presenta un incremento en la resistencia a la tracción (respecto a la resistencia patrón) de aproximadamente el doble del incremento respectivo a la mezcla sometida a dos horas de digestión (41% versus 19%).

Se debe tener en cuenta que, la resistencia a tracción indirecta de las mezclas asfálticas está definida principalmente por la cohesión que proporciona el asfalto, es decir, la propiedad de mantener ligadas las partículas de árido.

La incorporación de polvo de caucho por vía seca, tras el proceso de digestión, produce dos efectos en la mezcla asfáltica a la que se adiciona y que modifican su capacidad cohesiva resultante; una es aumentar la viscosidad del cemento asfáltico y la otra tiene relación con la variación de la cantidad de asfalto disponible en los huecos (Vb), no absorbido por el árido.

En efecto, en el proceso de digestión, las partículas de caucho van progresivamente absorbiendo el asfalto incorporado. Mayores tiempos de digestión generan una mayor viscosidad del ligante, lo que mejora la capacidad cohesiva en la mezcla asfáltica modificada, pero disminuyen la cantidad de asfalto disponible entre las partículas de agregado (menores espesores de la película de asfalto), lo que reduce esta capacidad.

De esta manera, los resultados obtenidos responden a que la cohesión en una mezcla asfáltica modificada está principalmente definida por la cantidad de asfalto disponible en la mezcla, no absorbido por el polvo de caucho (ni el agregado), más que por la viscosidad del ligante, que también favorece esta propiedad pero en menor grado. Esto se comprueba al visualizar los huecos llenos con asfalto (Vb) en la Tabla 5-3, donde el valor representativo de la mezcla asfáltica modificada con una hora de digestión (Caucho-2 (1hr.)) es mayor que el respectivo a la mezcla con dos horas de digestión (Caucho-2 (2hrs.)).

Debido a que las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho permiten mayores contenidos de asfalto, se hace imprescindible complementar su análisis y

evaluación con ensayos de resistencia al ahuellamiento, a los cuales, dependiendo del tipo de ensayo escogido, se le pueden aplicar controles para mantener el parámetro evaluado (deformaciones plásticas máximas, velocidades de deformación, etc.) dentro de un umbral especificado. Esto permitiría validar los mayores contenidos de asfalto utilizados en estas mezclas, además de controlar las exudaciones, fundamental en caso de disminuir los tiempos de digestión (con mayor cantidad de asfalto disponible entre los huecos).

5.1.2.4. Ahuellamiento bajo agua a 50°C

El ensayo de ahuellamiento se realiza bajo agua y a una temperatura de 50°C con el dispositivo Rueda de Hamburgo (AASHTO T324-04). Para el ensayo se utilizan probetas cilíndricas de 150mm de diámetro y 60mm de altura, compactadas mediante compactador giratorio hasta un 97% de la densidad Marshall de diseño.

En el gráfico Profundidad de Ahuellamiento versus el número de pasadas de la rueda (Figura 5-4), se muestran las curvas representativas de los distintos tipos de mezclas asfálticas analizadas.

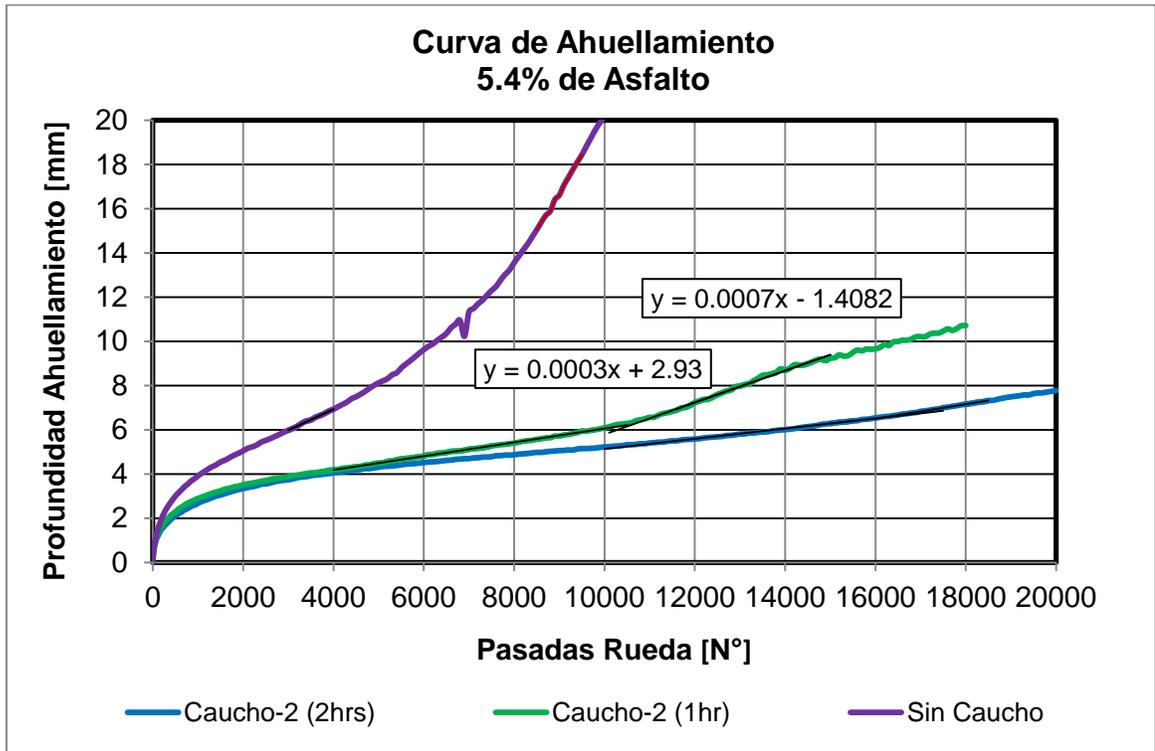


Figura 5-4. Efecto de la incorporación de polvo de caucho y el tiempo de digestión en el ahuellamiento por ensayo de Hamburgo.

A partir de las curvas, se caracterizan las mezclas según los siguientes parámetros:

- **SIP:** Punto de desprendimiento del asfalto (N° Pasadas).
- **NF:** Número de pasadas de la rueda en la falla (N° Pasadas).
- **Ah:** Ahuellamiento en la falla (mm).
- **CS:** Pendiente de deformación o Creep Slope (mm/1000 Pasadas).
- **SS:** Pendiente de desprendimiento o Strip Slope (mm/1000 Pasadas).

En Tabla 5-7, se observa que la mezcla asfáltica sin incorporación de polvo de caucho se deforma rápidamente alcanzado los 20mm de ahuellamiento antes de concluir las 20000 pasadas, a diferencia de las mezclas asfálticas modificadas, que alcanzan ese número de pasadas con valores de profundidad menores; del orden de los 10mm. Se debe tener en cuenta que en las mezclas asfálticas modificadas sometidas a tiempos de digestión más extensos, las deformaciones máximas (a las 20000 pasadas) resultan menores, por el mayor grado de viscosidad del ligante alcanzado.

Tabla 5-7. Condición de término en ensayo de Hamburgo.

Tipos de mezclas asfálticas	NF	Ah _{NF}
	[N° Pasadas]	[mm]
Sin Caucho-2	10600	21.5
Caucho-2 (1hr)	20000	12.0
Caucho-2 (2hrs)	20000	7.8

Para el número de falla de la mezcla asfáltica sin incorporación de polvo de caucho (10600 pasadas de la rueda), se determinan las profundidades de ahuellamiento porcentual respecto a la altura de la probeta (60mm). Esto se muestra en la Tabla 5-8, para todos los tipos de mezclas asfálticas evaluados.

Tabla 5-8. Ahuellamiento en la falla de la mezcla asfáltica sin polvo de caucho.

Tipos de mezclas asfálticas	NF Sin Caucho-2	Ah _{NF sin caucho-2}	
	[N° Pasadas]	[mm]	[%]
Sin Caucho-2	10600	21.5	36
Caucho-2 (1hr)		6.3	11
Caucho-2 (2hrs)		5.3	9

Como se observa, a ese número de pasadas, no son apreciables grandes diferencias en las deformaciones sufridas por las mezclas asfálticas modificadas sometidas a distintos tiempos de digestión (del orden de 10% ambas).

En la Tabla 5-9, se presentan los restantes parámetros de caracterización de obtenidos en el ensayo. Se observa que las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho (ambos tiempos de digestión) presentan mayor resistencia a la disgregación (SIP) que la mezcla asfáltica tradicional, lo que es indicativo de que el caucho mejora la adherencia del árido con el ligante. Se observa que esta resistencia resulta mayor en la mezcla sometida a mayor tiempo de digestión.

Tabla 5-9. Parámetros de ahuellamiento por ensayo de Hamburgo.

Tipo de mezcla asfáltica	SIP	Ah _{SIP}	CS	SS
	[N° Pasadas]	[mm]	[mm/1000 Pasadas]	[mm/1000 Pasadas]
Sin Caucho-2	7227	11.7	1.00	3.40
Caucho-2 (1hr)	10846	6.5	0.30	0.70
Caucho-2 (2hrs)	15479	6.4	0.20	0.30

Por otro lado, los valores de las velocidades de deformación antes y después del punto de desprendimiento (SIP), caracterizados por la pendiente CS y SS respectivamente, son notoriamente más bajos en las mezclas asfálticas modificadas que en la mezcla asfáltica convencional. En este último caso, el efecto del agua después del SIP es muy desfavorable; se alcanza la falla por deformación (20mm) rápidamente (el valor de la pendiente SS es casi cuatro veces el de la pendiente CS). Muy por el contrario, en el caso de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho, los valores de las pendientes CS y SS, se mantienen más estables, lo que indica que a pesar de la penetración del agua (después del SIP), el desprendimiento de árido y por ende la deformación producida por su efecto, son menores (las velocidades de deformación después del SIP (SS) son casi el doble de las velocidades de deformación (CS) antes de ese punto).

Con respecto a la disminución del tiempo de digestión a la mitad, se observa un leve incremento en las velocidades de deformación CS y SS, respecto a los valores obtenidos para la mezcla asfáltica con dos horas de digestión.

De esta manera, en las mezclas asfálticas modificadas, el aumento en la viscosidad del ligante, producto de la incorporación de polvo de caucho y de un proceso de digestión efectivo, genera películas de asfalto más resistentes al efecto del agua. Además, la mayor cohesividad alcanzada, les confiere a las mezclas una mayor resistencia a la pérdida de partículas (disgregación). Sin embargo, como es de esperar, a menor tiempo de digestión, estos efectos se hacen menos notorios.

Se debe tener en cuenta, que este ensayo de ahuellamiento solo permite caracterizar y comparar las diversas mezclas asfálticas según su deformación plástica y susceptibilidad a la humedad (stripping), y estimar así sus desempeños relativos durante su vida en servicio, sin embargo no refleja fielmente el fenómeno de

ahuellamiento que sufren las mezclas asfálticas una vez colocadas en el pavimento, dado que las condiciones de ensayo son extremas (ruedas de acero, agua a elevada temperatura, etc.).

5.2. Análisis comparativo con estudios anteriores

A continuación, se realiza una comparación a nivel de Laboratorio, entre los resultados obtenidos en este estudio, para la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho por vía seca utilizada en el primer Tramo de Prueba (5.3% de asfalto r.a.), con los obtenidos en estudios anteriores realizados en el Laboratorio Nacional de Vialidad (LNV), también relativos a estas mezclas modificadas. Se consideran los siguientes Trabajos para optar al título de ingeniero civil:

- “Estudio del efecto de la variación en la granulometría del caucho en mezclas asfálticas por vía seca”, Universidad de Chile, año 2007.
- “Evaluación cuantitativa del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas modificadas incorporando polvo de caucho de N.F.U. nacional mediante vía seca”, Universidad Andrés Bello, año 2011.

Los parámetros de comparación corresponden básicamente a los que tienen en común las tres investigaciones consideradas. Estos son:

- Estabilidad Marshall.
- Módulos Resilientes a 25°C.
- Resistencia a la Compresión diametral a 25°C (NLT-346).

5.2.1. Información de diseño de mezclas asfálticas en estudio

5.2.1.1. Dosificación

Para efectos prácticos, las mezclas asfálticas a comparar se designan según el año de realización del estudio, como mezcla Tesis 2007, Tesis 2011 y Tesis 2013, siendo esta última mezcla, la representativa del presente trabajo (primer Tramo de Prueba).

En el primer estudio (Tesis 2007), el polvo de caucho de NFU utilizado es de origen importado (China), mientras que en el segundo y en el actual trabajo (Tesis 2011 y Tesis 2013, respectivamente), es de origen nacional. Los porcentajes de

incorporación adoptados son idénticos en todos los casos, siendo iguales a 0.5% respecto al peso del agregado.

Las granulometrías del polvo de caucho utilizado en los diversos estudios, se observan en Figura 5-5 y Figura 5-6. En el caso del polvo de caucho importado (Tesis 2007), su granulometría es fina (cumple banda granulométrica P-3, especificada en norma NCh 3258-2012), mientras que la granulometría del de origen nacional (Tesis 2011 y Tesis 2013), es intermedia (cumplen banda granulométrica especificada P-2 en norma NCh 3258-2012).

Con respecto al árido, para el estudio del 2007 se utilizó una mezcla tipo semidensa IV-A- 20, mientras que para los estudios del 2011 y el actual trabajo, la mezcla fue de tipo semidensa IV-A- 12.

Los cementos asfálticos ocupados en todos los casos son del tipo CA-24, sin embargo, las dotaciones utilizadas en los distintos estudios relativas a la mezcla asfáltica tradicional base (sin incorporación de polvo de caucho por vía seca), presentan diferencias. En la Tabla 5-10, se muestra el contenido óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica tradicional original y el contenido de asfalto de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho, para cada estudio. Como se puede observar, en los trabajos anteriores no se aumentó el contenido de asfalto respecto a la mezcla asfáltica tradicional base, a diferencia del presente trabajo.

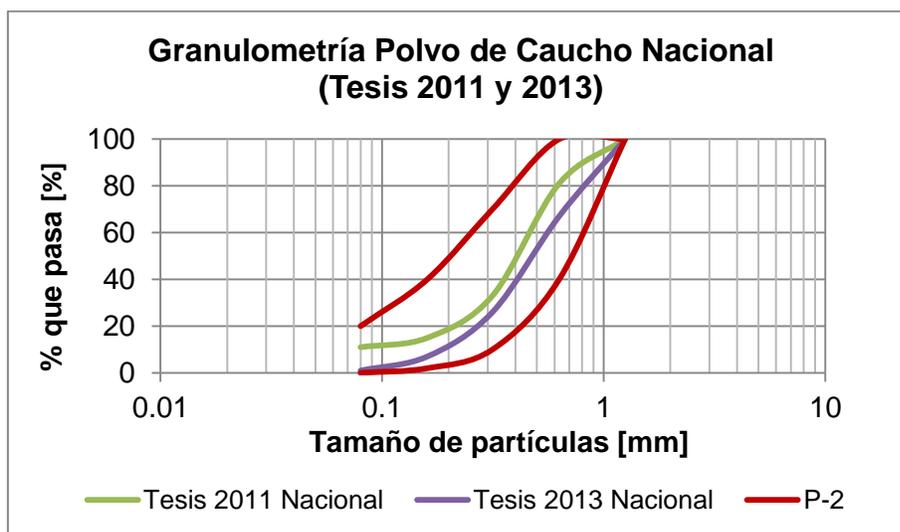


Figura 5-5. Granulometría del polvo de caucho nacional y banda especific. P-2.

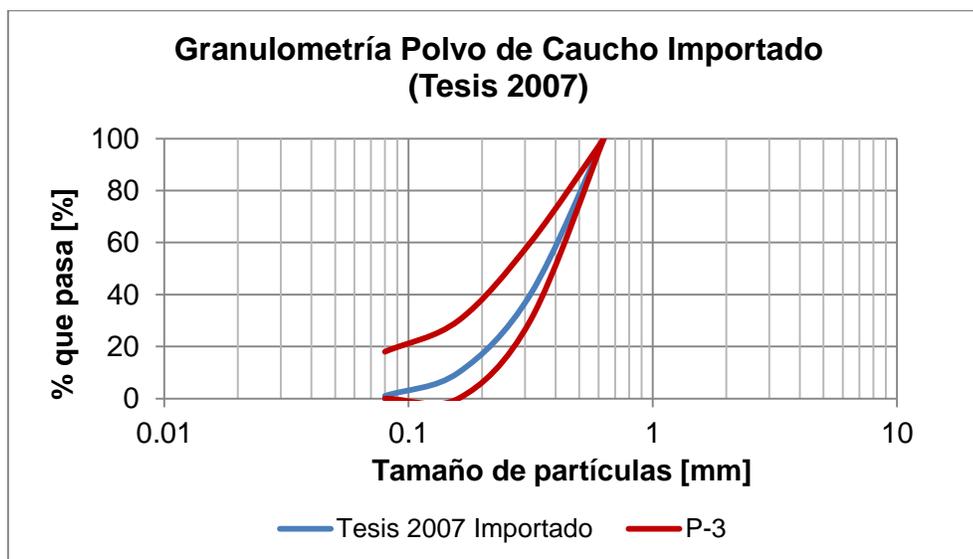


Figura 5-6. Granulometría del polvo de caucho importado y banda especific. P-3.

Tabla 5-10. Contenidos de asfalto de mezclas asfálticas originales y modificadas.

Tipo de mezclas asfálticas	Contenido cemento asfáltico [% r.a.]		
	Tesis 2007	Tesis 2011	Tesis 2013
Tradicional (base)	4.9	5.1	5.1
Modificada con polvo de caucho	4.9	5.1	5.3

Finalmente, en la Tabla 5-11, se presenta un resumen de las características de diseño de las mezclas asfálticas modificadas a comparar.

Tabla 5-11. Características de diseño de mezclas asfálticas modificadas.

Mezclas asfálticas modificadas		Tesis 2007	Tesis 2011	Tesis 2013
Áridos	Banda especificada (5.408.201 (4) del M.C.-V. 5)	IV A 20	IV A 12	IV A 12
Cemento Asfáltico	Tipo	CA - 24	CA - 24	CA - 24
	Contenido [% r.a.]	4.9	5.1	5.3
Polvo de Caucho	Banda especificada (NCh 3258 - 2012)	P - 3	P - 2	P - 2
	Contenido [% r.a.]	0.5	0.5	0.5
Digestión	Temperatura [°C]	170	170	170
	Tiempo [horas]	2	2	2

5.2.1.2. Resistencia Conservada tras inmersión

Las resistencias conservadas de las mezclas asfálticas modificadas analizadas, se presentan en la Tabla 5-12 y, como se observa, los ensayos realizados para su determinación no son los mismos.

En efecto, desde el presente trabajo se opta por utilizar el ensayo de tracción indirecta tras inmersión para la determinación de este parámetro (ITSR), según las normas europeas UNE-EN 12697-23 y UNE-EN 12697-12, cuyo requisito mínimo de resistencia conservada es de 85%. En los estudios anteriores, su determinación se realizó a través del ensayo de Inmersión-Compresión (IRC), según las normas españolas NLT-161 y NLT-162, cuya exigencia mínima es de 75%.

Tabla 5-12. Resistencia Conservada de mezclas asfálticas modificadas.

Mezclas asfálticas modificadas	Resistencia Conservada tras inmersión [%]		
	Tesis 2007	Tesis 2011	Tesis 2013
IRC > 75%	98	85	-
ITSR > 85%	-	-	91

Se observa como la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho de granulometría fina (Tesis 2007), supera notablemente el mínimo exigido para la resistencia conservada correspondiente (en más de 20%), en comparación a las otras mezclas con granulometrías de polvo de caucho más gruesas.

5.2.1.3. Análisis Marshall

En la Tabla 5-13, se presentan los resultados del análisis Marshall (8.302.40 y 8.302.47 del M.C.-V.8) obtenidos para cada una de las mezclas asfálticas modificadas analizadas.

Se observa que todas las mezclas modificadas verifican las especificaciones del Manual de Carreteras para mezclas asfálticas en caliente convencionales (5.408.203 del M.C.-V.5). En todos los casos, las estabildades superan notablemente el mínimo exigido de 9000N.

Es posible distinguir también, que las mezclas asfálticas modificadas que presentan mayores resistencias conservadas en el ensayo de Inmersión-Compresión (Tesis 2007 y Tesis 2011), tienen también mayores valores de Estabilidad. Esto refleja

principalmente la mayor viscosidad que estas mezclas presentan, atribuible a no haber aumentado la dotación de asfalto respecto a la mezcla asfáltica original (sin modificar). Este efecto se manifiesta también, por los menores valores de fluidez obtenidos en las mezclas asfálticas modificadas de los estudios más antiguos (años 2007 y 2011).

Tabla 5-13. Parámetros Marshall de mezclas asfálticas modificadas.

Parámetros Marshall	Unidad	Tesis 2007	Tesis 2011	Tesis 2013	Control Calidad
Estabilidad	N	16076	16305	14362	> 9000
Fluidez	0.25mm	13	14	16	8 – 16
Densidad	kg/m ³	2378	2344	2313	
Huecos en la Mezcla	%	5.1	5.5	6.1	4 – 6
Vacíos en Agregado Mineral	%	16	16	17	> 14
Huecos llenos con asfalto	%	68.1	65.2	64.1	

5.2.2. Módulo Resiliente a 25°C

Los valores del Módulo resiliente (MR) a 25°C, obtenidos por el ensayo a tracción indirecta, según la norma europea UNE-EN 12697-26 anexo C, se muestran en la Tabla 5-14.

Tabla 5-14. Módulo resiliente a 25°C de mezclas asfálticas modificadas.

Mezclas asfálticas modificadas	Unidad	Tesis 2007	Tesis 2011	Tesis 2013
MR a 25°C	MPa	5236	4259	4029

Se observa que el valor obtenido en el presente trabajo, es notoriamente inferior respecto al valor de la investigación del año 2007, sin embargo, esta diferencia es menos notoria en relación al valor del estudio del año 2011.

La mayor rigidización de la mezcla asfáltica modificada (bajo cargas repetidas) del trabajo del año 2007, puede ser atribuida al hecho de no haber aumentado la dotación de asfalto y a la granulometría del polvo de caucho más fina utilizada. Estos son factores que favorecen la absorción de asfalto por parte del caucho, principalmente maltenos (que otorgan flexibilidad a la mezcla asfáltica), lo que aumenta considerablemente la viscosidad del ligante efectivo en la mezcla (no absorbido el árido ni el caucho), y por lo tanto su rigidez.

5.2.3. Compresión diametral

Los valores de la resistencia a compresión diametral obtenidos del ensayo realizado según la norma española NLT-346 (a 25°C), se muestran en la Tabla 5-15.

Tabla 5-15. Resistencia a compresión diametral de mezclas asfálticas modificadas.

Mezclas asfálticas modificadas	Unidad	Tesis 2007	Tesis 2011	Tesis 2013
Rt	MPa	1.44	1.65	1.27

Se observa una disminución leve en el valor obtenido en el presente trabajo, respecto a los resultados de las investigaciones anteriores.

CAPÍTULO 6 ESTUDIO COMPARATIVO DE COSTOS

Las mezclas asfálticas en caliente con aportación de polvo de caucho por vía seca, presentan un mejor comportamiento que las mezclas con asfalto tradicional, según las diversas propiedades analizadas tanto en este trabajo (Capítulo 4 y Capítulo 5) como en las investigaciones pasadas realizadas en el Laboratorio Nacional de Vialidad (LNV). Sin embargo, dada la modificación en la reología del ligante y las consecuentes mejoras técnicas que se pueden obtener con la utilización de estas mezclas, se hace imprescindible estudiar también su comportamiento en relación al de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros nuevos (asfaltos modificados). Esta comparación resulta más competitiva que con las mezclas tradicionales.

Recientemente en el LNV, se llevó a cabo un estudio a nivel de Laboratorio para comparar el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho por vía seca con el de las mezclas confeccionadas con cemento asfáltico modificado con polímero (de tipo elastómero SBS) y con cemento asfáltico de tipo multigrado, para capas de rodadura¹³, siendo las propiedades para caracterizarlas las mismas utilizadas en el presente estudio. De manera general, los resultados obtenidos concluyeron que la modificación de las mezclas con polvo de caucho por vía seca, permite conseguir ventajas semejantes, aunque en menor grado, que las indicadas para los asfaltos modificados con polímero, lo que no ocurre con las mezclas con asfalto multigrado, cuyo comportamiento según las propiedades analizadas, es inferior al de las mezclas con caucho.

En este Capítulo se abordan los distintos tipos de mezclas asfálticas anteriormente señaladas, pero desde el punto de vista de sus costos. Para este análisis se exceptuarán las mezclas con asfalto multigrado, cuyo uso actualmente no es tan masivo, muy pocas Empresas las comercializan.

Las mezclas modificadas con asfaltos poliméricos, al igual que las tradicionales, se encuentran especificadas en normativa nacional, sin embargo, debido a procesos de elaboración más complejos, presentan elevados precios.

¹³ JORQUERA, Camilo, PEÑALOZA, Andrea. 2013. Estudio comparativo del comportamiento de mezclas asfálticas modificadas versus mezclas asfálticas en caliente con polvo de caucho de NFU nacional mediante vía seca. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago, Chile. Universidad de Santiago.

5.3. Estudio de costos

Para este estudio, los distintos tipos de mezclas asfálticas consideradas (para capa de rodadura) y sus respectivos materiales componentes son:

1. Mezcla asfáltica tradicional:

- a. Áridos en banda granulométrica especificada IV A 12.
- b. Cemento asfáltico del tipo CA-24 (tradicional).

2. Mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho adicionado por vía seca:

- a. Áridos en banda granulométrica especificada IV A 12.
- b. Cemento asfáltico del tipo CA-24 (tradicional).
- c. Polvo de caucho.

3. Mezcla asfáltica modificada con polímero:

- a. Áridos en banda granulométrica especificada IV A 12.
- b. Cemento asfáltico del tipo CA-60-80 modificado con SBS (polímero).

A partir de tres Empresas productoras consultadas, se obtuvieron los precios de mercado para este año 2013 de los diferentes tipos de mezclas asfálticas a analizar (incluida su colocación en terreno). A la vez, para cada tipo de mezcla se calculó su precio promedio, exceptuando el caso de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho, ya que solo una Empresa la ha producido hasta ahora (la que ha construido los dos tramos de prueba de este estudio). Estos se señalan en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Precios de las mezclas asfálticas con colocación incluida.

Precios	Mezcla Tradicional	Mezcla Modificada con Polímero	Mezcla Modificada con Polvo de Caucho
	[\$/m ³ + IVA]	[\$/m ³ + IVA]	[\$/m ³ + IVA]
Empresa A	67000	92000	78000
Empresa B	68700	92100	-
Empresa C	68500	105500	-
Promedio	68067	96533	78000

Adicionalmente, se consultaron los precios de mercado de los distintos tipos de asfaltos a incorporar en las respectivas mezclas asfálticas (tradicional o polimérico) y el del polvo de caucho nacional que se utiliza exclusivamente en las mezclas modificadas por vía seca, en sus dos granulometrías comercializadas (con y sin proceso de pulverizado).

Los valores que entregaron los productores respectivos consultados, se señalan a continuación (Tabla 6-2 y Tabla 6-3). Estos incluyen el IVA, pero se omite de aquí en adelante para facilitar la lectura.

Tabla 6-2. Precios de los cementos asfálticos.

Cemento Asfáltico	Precios + IVA [\$/kg]
Tradicional	400
Modificado con Polímeros	600

Tabla 6-3. Precios del polvo de caucho nacional.

Polvo de Caucho	Precios + IVA [\$/kg]
No pulverizado (tamaño máximo 0.8mm)	300
Pulverizado (tamaño máximo 0.05mm)	400

Finalmente, considerando los costos de producir las mezclas asfálticas iguales a sus precios de venta, se realizará un desglose en los costos para determinar la influencia de los diferentes factores que los determinan, principalmente el costo de las materias primas (ligante, árido y, eventualmente, polvo de caucho) y el costo general del proceso, que incluye las etapas de fabricación, transporte y colocación.

En la Tabla 6-4, se resumen los precios considerados para el estudio de costos. En el caso del polvo de caucho, se utilizó el precio más desfavorable (caucho pulverizado).

Tabla 6-4. Precios de las mezclas asfálticas y sus componentes.

Precios		Mezcla colocada	Asfalto	Polvo de Caucho
		[\$/m3 + IVA]	[\$/kg + IVA]	[\$/kg + IVA]
Tipo de Mezcla	Tradicional	68067	400	-
	Modificada con Polímero	96533	600	-
	Modificada con Polvo de Caucho	78000	400	400

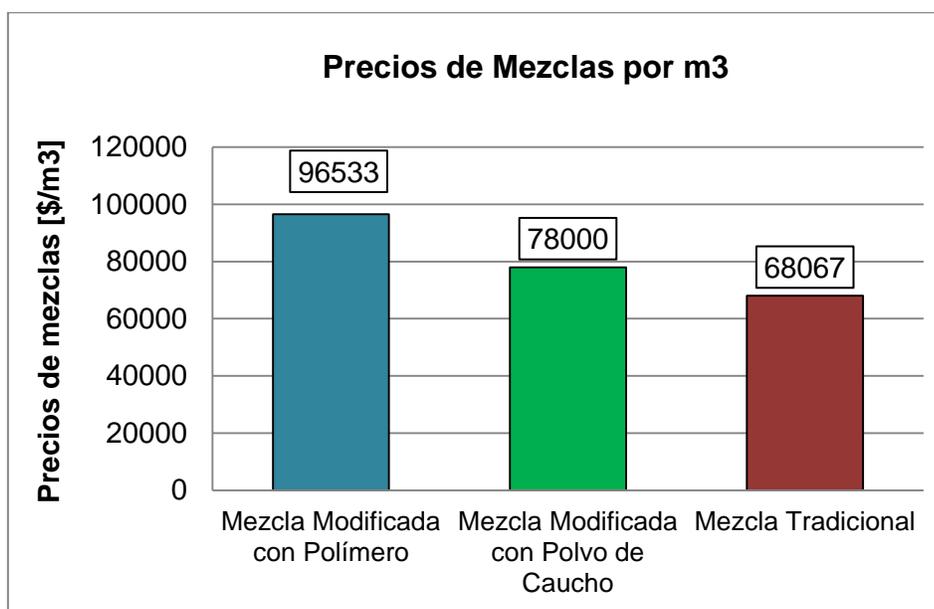


Figura 6-1. Precios de las mezclas asfálticas por metro cúbico.

Para realizar este análisis, se ocuparon las mismas dosificaciones de asfalto y caucho de los Contratos donde se incorporaron los tramos de prueba estudiados, con una dosificación de 5.1% de asfalto referida al peso del agregado (% r.a. ¹⁴) para las mezclas tradicionales y de 5.4% para las mezclas con incorporación de 0.5% de caucho, ambos porcentajes referidos al agregado (segundo Tramo de Prueba). Para las mezclas con polímero se considera un contenido de asfalto igual al de las mezclas tradicionales, de 5.1% r.a.

En la Tabla 6-5, se presentan las proporciones en que se encuentran los materiales componentes de las mezclas anteriormente señaladas, pero referidos al peso de la mezcla (% r.m.).

Tabla 6-5. Dosificación referida al peso de la mezcla.

Dosificación		Asfalto	Agregado	Polvo de Caucho
		[% r.m.]	[% r.m.]	[% r.m.]
Tipo de Mezcla	Tradicional	4.9	95.1	-
	Modificada con Polímero	4.9	95.1	-
	Modificada con Polvo de Caucho	5.1	94.4	0.47

A partir de estos valores y considerando que la densidad aparente suelta de las mezclas es de 1700kg/m³ (mezcla esponjada en camión), en la Tabla 6-6 se muestra

¹⁴ % r.a.: abreviatura de “porcentaje referido al peso del agregado”.

para 1m³ de cada mezcla (equivalentes a 1700kg) las proporciones en peso de sus respectivos componentes. Se debe hacer notar que las mezclas con incorporación de polvo de caucho tienen menores densidades que las otras, pero se desprecia ese factor por simplicidad.

Tabla 6-6. Peso de los componentes por metro cúbico de mezcla asfáltica (1700kg).

Peso de insumos por metro cúbico de mezcla asfáltica		Mezcla	Asfalto	Agregado	Polvo de Caucho
		[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
Tipo de Mezcla	Tradicional	1700	82	1618	-
	Modificada con Polímero	1700	82	1618	-
	Modificada con Polvo de Caucho	1700	87	1605	8

Considerando los precios de la Tabla 6-4 y los pesos de la Tabla 6-6, se obtienen los siguientes costos por metro cubico de mezcla, separados en costos por materias primas y por proceso generalizado:

Tabla 6-7. Costos por metro cúbico de mezcla asfáltica.

Costos por m ³ de mezcla asfáltica		Asfalto	Proceso + Agregado	Polvo de Caucho
		[\$/m3]	[\$/m3]	[\$/m3]
Tipo de Mezcla	Tradicional	32997	35070	-
	Modificada con Polímero	49496	47037	-
	Modificada con Polvo de Caucho	34674	40115	3211

En la Figura 6-2, para cada tipo de mezcla se puede observar los costos totales y de cada ítem considerado por un metro cúbico de ella. Queda claramente a la vista que el costo del asfalto, independiente del tipo de mezcla considerado es muy influyente en el costo total de la mezcla colocada (es la mitad aproximadamente del costo total). Dado que no se cuenta con los costos de los áridos, no se es posible realizar el desglose entre los costos del material pétreo y el proceso generalizado.

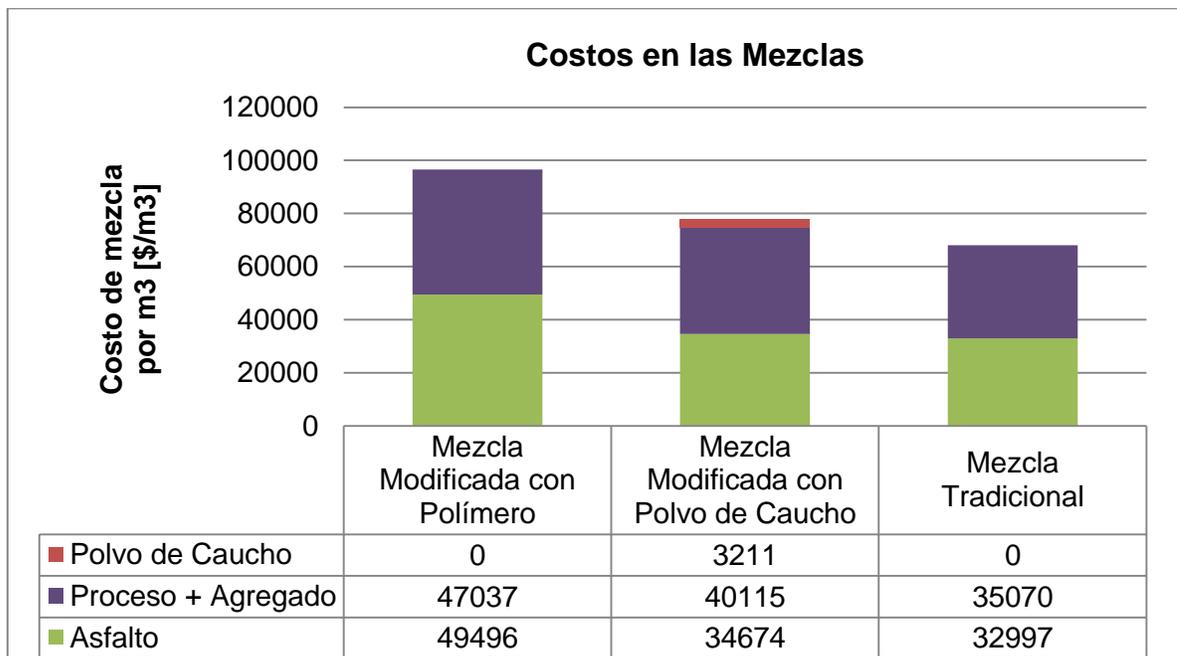


Figura 6-2. Costos por metro cúbico de mezcla asfáltica.

De la Figura 6-3, es posible definir para la mezcla tradicional, la preponderancia de los costos, tanto por el asfalto como por el proceso y los agregados, que definen el costo total de la mezcla colocada.

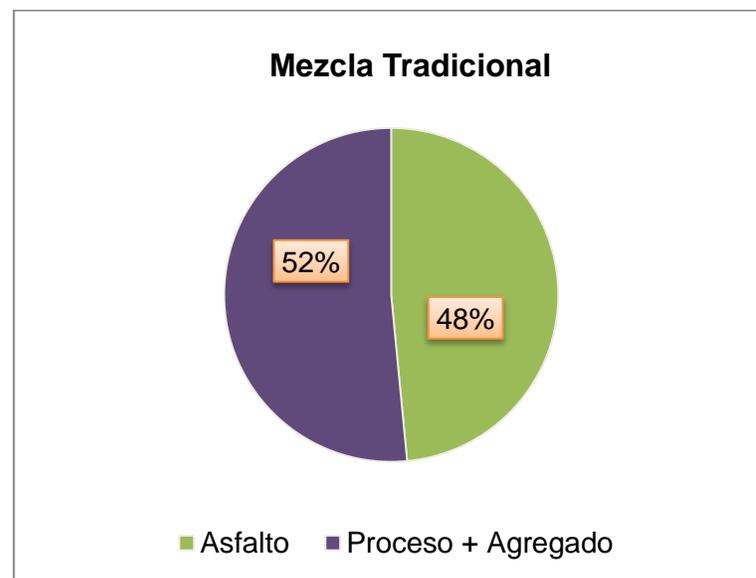


Figura 6-3. Costos relativos en la mezcla asfáltica tradicional.

Al considerar el costo total de la mezcla tradicional como patrón (68.067[\$/m³]), se pueden comparar los incrementos en los costos, por concepto de asfalto y de proceso, de utilizar mezclas modificadas con polímero o con polvo de caucho, como se

muestra en la Figura 6-4. Se debe tener en cuenta que dado que los áridos son los mismos en ambos tipos de mezcla, no influyen en el análisis porcentual al compararlas.

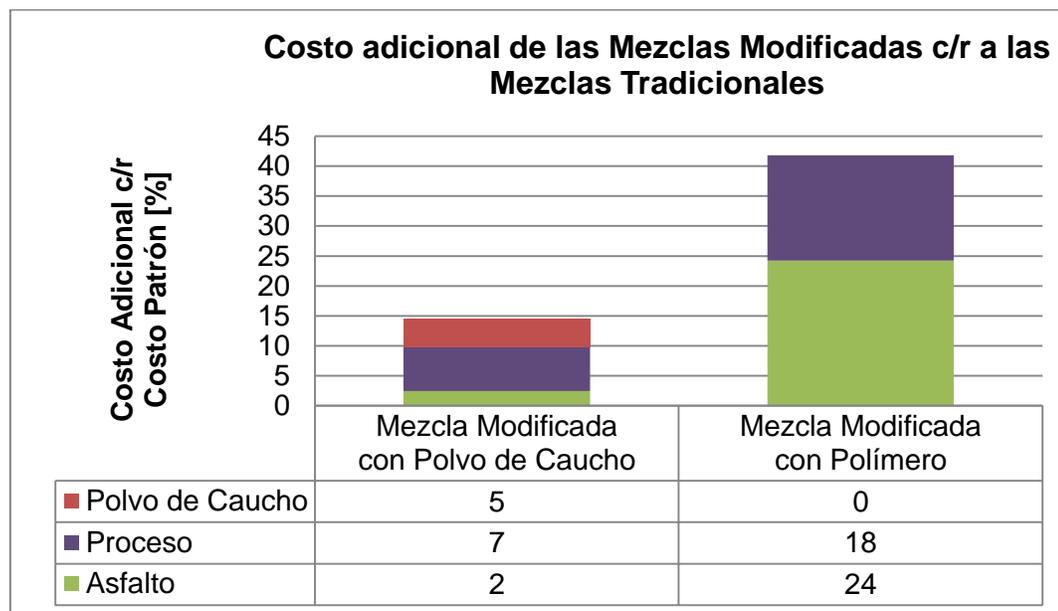


Figura 6-4. Costos adicionales por el uso de las mezclas asfálticas modificadas (vía seca vs. asfaltos elastoméricos).

De la gráfica, se observa como el costo del polvo de caucho nacional, que actualmente es del mismo orden que el asfalto tradicional, influye notablemente en el incremento del costo respecto al costo patrón (un tercio).

El utilizar una mezcla modificada con polvo de caucho en reemplazo de una tradicional, implica un gasto adicional de 9933[\$/m³], lo que equivale a un 15% del costo patrón. De ese 15%, un 2% es por concepto de asfalto (incremento en la dotación de ligante de 0.2% aproximadamente, respecto al peso de la mezcla), un 7% es por el proceso generalizado y el 5% restante se debe al costo del polvo de caucho (componente adicional). En relación al incremento en los costos de proceso de las mezclas con incorporación de caucho, se debe tener en cuenta los principales factores que lo determinan:

- El costo adicional debido al incremento de energía por la elevación de la temperatura de fabricación de la mezcla (unos 10°C al menos).
- El costo adicional debido a la disminución del rendimiento (aumento del volumen de la mezcla, utilización de mayor número de camiones, etc.).

De igual manera, tomando como patrón el costo total de la mezcla tradicional (100%), el utilizar una mezcla modificada con polímeros en vez de una mezcla tradicional significa un incremento de 28.466 [\$/m³], que equivalen a un 42% adicional

al costo patrón. De este incremento, el 24% es por el alto precio del asfalto con polímero (mucho más caro que el asfalto tradicional) y un 18% es por el incremento en el costo del proceso generalizado (principalmente por las elevadas temperaturas de fabricación que se requieren para lograr una viscosidad adecuada).

Se ve claramente que el incremento en los costos por modificar las mezclas con polvo de caucho en vez de hacerlo con polímeros nuevos (asfaltos modificados) es significativamente menor (equivalente a un tercio aproximadamente), a pesar del aumento de 0.2% r.a. en la dotación de asfalto y de la incorporación de 0.5% r.a. de polvo de caucho, cuyo precio como ya se mencionó, es del mismo orden del asfalto utilizado.

Con respecto a los costos por asfalto, el incremento respecto al costo patrón por utilizar un asfalto tradicional con incorporación de polvo de caucho (5%+2%) es notablemente menor que el incremento por utilizar un asfalto modificado con polímero (24%).

Sumado a esto, los adicionales costos asociados al proceso de cada una de estas mezclas modificadas (respecto a las mezclas tradicionales) son también muy distintos, aunque se mantiene la ventaja de las mezclas con incorporación de polvo de caucho por vía seca respecto a las mezclas con asfalto modificado con polímero (18% versus 7%, respectivamente). Los mayores costos de proceso de las mezclas modificadas con polímeros obedecen principalmente a la mayor viscosidad asociada a estas mezclas, que requieren mayores temperaturas de fabricación que las mezclas modificadas con caucho (menos viscosas).

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan los resultados y conclusiones más importantes que se han obtenido en este trabajo, además de recomendaciones para futuras investigaciones referentes a las mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho por vía seca para capas de rodadura:

6.1. Conclusiones generales

Con respecto a la dosificación, se plantea que en mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho de N.F.U. por vía seca, el óptimo de asfalto es el contenido mínimo que para una temperatura y un tiempo de digestión definidos, permite cumplir la exigencia de resistencia conservada a la acción del agua, determinada mediante el ensayo de inmersión-compresión o a tracción indirecta tras inmersión (en este caso cuantificada y evaluada bajo los estándares españoles), manteniendo a la vez los criterios volumétricos (huecos), como también los de estabilidad y deformación Marshall dentro de las especificaciones del Manual de Carreteras para mezclas asfálticas convencionales en carpeta (5.408.203 del M.C.-V.5).

El procedimiento de diseño difiere del de una mezcla asfáltica convencional (Método Marshall), ya que se requiere la realización de ensayos adicionales para determinar las condiciones de digestión mínimas que aseguren la efectividad de este proceso, es decir, que la modificación de las propiedades reológicas y el aumento de la viscosidad producido en la mezcla asfáltica (ligante) sean suficientes para mejorar sus prestaciones como material para carreteras (en relación a una mezcla convencional).

En cuanto al proceso de digestión, determinante en la calidad de la mezcla asfáltica modificada, además de la temperatura a la que se efectúa y la granulometría y el porcentaje de incorporación del polvo de caucho (estudios anteriores), el contenido de cemento asfáltico y el tiempo de digestión son variables que la condicionan significativamente. El parámetro más crítico de la adición de caucho por vía seca, es el tiempo de digestión.

Los ensayos de control para los asfaltos convencionales y para los áridos son los usuales para estos materiales, pero algunos de los ensayos para el polvo de caucho y las mezclas asfálticas necesitan equipos especiales o presentan modificaciones respecto a los ensayos convencionales, y por lo tanto debe instruirse a los operarios para que los realicen correctamente y a los técnicos de control para que los interpreten de manera adecuada.

La incorporación de polvo de caucho en mezclas para carpeta pueden aportar ventajas importantes a la carretera desde el punto de vista técnico y económico y, por lo tanto, es factible su uso para mejorar el comportamiento a deterioros comunes de los pavimentos, ya que proporcionan un pavimento con mejores respuestas a los cambios térmicos, así como también mayor resistencia a la fisuración por fatiga (estudios anteriores), al ahuellamiento y al envejecimiento y susceptibilidad a la humedad. De esta manera, se aumenta la vida útil de los caminos y disminuyen los costos de mantenimiento.

No obstante, las mezclas asfálticas modificadas por vía seca necesitan procedimientos específicos de fabricación y condiciones controladas de ejecución, por lo que precisan empresas adiestradas y de un control de calidad riguroso. El método de vía seca no requiere muchas variaciones en Planta (se maneja el polvo de caucho como un filler de aportación, incorporándolo cuando los áridos estén calientes, antes de añadir el asfalto, y el periodo de mezclado es levemente superior al de una mezcla convencional), solo se debe controlar el tiempo de digestión (período de almacenamiento, antes de la compactación, para que el material termine su modificación) y la temperatura de compactación (superior al de una mezcla asfáltica convencional). De esta manera, la tecnología se hace accesible a las empresas fabricantes de mezclas asfálticas y no sólo a las que fabrican asfaltos modificados, como sucede por la vía húmeda.

Con respecto a la colocación y compactación de la mezcla en terreno, dada la mayor viscosidad y la rapidez con que se enfría respecto a una mezcla asfáltica convencional, se deben extremar el control de temperaturas, tanto de la mezcla como de las condiciones ambientales. Las condiciones de temperatura planteadas en el Manual de Carreteras para mezclas asfálticas convencionales (5.408.303 (1) y (2) del M.C.-V.5), se deben incrementar.

Con respecto a la evaluación de los pavimentos según su condición estructural, y funcional, los controles receptivos y las especificaciones del Manual de Carreteras para mezclas asfálticas convencionales en capas de rodadura (5.408.303 y 5.408.304 del M.C.-V.5) son suficientes y válidos para asegurar una superficie con estándares mínimos de durabilidad, desempeño, comodidad y seguridad.

Las mezclas modificadas con polvo de caucho de N.F.U. por vía seca ajustadas a la realidad nacional permiten mejorar las propiedades del pavimento de una manera más económica que con asfaltos modificados con polímero. El polvo de caucho reciclado de N.F.U. nacional disponible puede ser incorporado mediante vía seca incluso sin disminuir más los tamaños de sus partículas, es decir, que la granulometría alcanzada en el proceso de trituración simplemente, sin pulverizado, es suficiente para aportar ventajas a la carretera desde el punto de vista técnico. Esto permite trabajar directamente con el polvo de caucho del país, sin inversiones adicionales (por importación, procesos de pulverizado, etc.), y su utilización como material para pavimentos asfálticos se plantea como una solución ambiental viable para dar un valor

agregado adicional al caucho nacional producto del reciclado de neumáticos desechados.

6.2. Conclusiones específicas

a. Respecto a las ventajas técnicas:

- La mezcla con la incorporación de polvo de NFU por vía seca, con 0.5% de polvo de caucho respecto al peso del agregado (equivalente a un 9% respecto al peso del cemento asfáltico, aproximadamente) con tiempos de digestión de dos horas y una hora y media y temperatura de digestión de 170°C poseen un comportamiento mecánico superior al de una mezcla con asfalto tradicional. En efecto, a partir de los ensayos realizados en Laboratorio, el desempeño de las mezclas modificadas con polvo de caucho resulta mejor que el de las mezclas convencionales; presenta mayor resistencia a la deformación plástica (ahuellamiento), menor susceptibilidad a la humedad (mejor adhesión), menor susceptibilidad térmica, mayor resistencia a la tracción, tanto en condición seca como húmeda (cohesión). Además, por las mayores dotaciones de asfalto, tienen mayor resistencia al envejecimiento (durabilidad).
- En los tramos de prueba (mezclas modificadas con 0.5% de polvo de caucho y digestión a 170°C por dos horas en carpeta), con respecto a los pavimentos convencionales, se verifican: desde el punto de vista de la seguridad vial, una mejor adherencia de los vehículos con el pavimento; desde el punto de vista de las propiedades funcionales, mejoras a la resistencia a la deformación plástica (ahuellamiento); y respecto a la condición estructural, una mayor capacidad de la estructura.

b. Respecto a las especificaciones técnicas:

- A pesar de la mayor dotación de asfalto ocupada en las mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho, no se obtuvo deformaciones Marshall superiores a las de las mezclas convencionales, como se esperaba, incluso con una hora de digestión (a pesar que la viscosidad alcanzada es menor que a dos horas). De esta manera, en relación a los controles de calidad, no es necesario modificar la especificación señalada para el parámetro de fluidez en 5.408.203 del M.C.-V.5. Se debe tener en cuenta que las deformaciones Marshall no son concluyentes respecto a la tendencia a las deformaciones plásticas de la mezcla, a diferencia del ensayo de ahuellamiento, donde los efectos de la incorporación de polvo de caucho y el tiempo de digestión son notorios.

- La determinación del contenido de asfalto puede realizarse mediante métodos usuales como el procedimiento del horno de ignición. En las mezclas fabricadas por vía seca, el resultado será la suma del contenido de asfalto y el del polvo de caucho. Es necesario, sin embargo, llevar a cabo una calibración previa, con una mezcla asfáltica de idéntica composición a la extendida en obra, incorporando en Laboratorio la cantidad conocida de polvo de caucho a la mezcla. Esto permite calcular un coeficiente de calibración que se debe comprobar posteriormente en mezclas de prueba fabricadas en Planta.
- La puesta en obra de las mezclas asfálticas que incorporan polvo de caucho por vía seca se realiza con extendedoras convencionales. Las únicas precauciones a adoptar son las de extremar las medidas que eviten el enfriamiento prematuro de la mezcla asfáltica, ya que su elevada viscosidad, al igual que las mezclas modificadas con elastómeros, hace muy difícil la compactación a temperaturas inferiores a 120°C, a las que algunas mezclas convencionales son todavía manejables. Las mezclas con polvo de caucho únicamente deben extenderse cuando las condiciones climáticas sean favorables.
- La compactación se puede hacer con los equipos convencionales de rodillos metálicos y de neumáticos, y debe iniciarse lo antes posible y con la mezcla a temperatura elevada, a unos 150°C. Los compactadores deben ir tan próximos a la extendidora como sea posible. Hay que tener en cuenta que el periodo para realizar la compactación sin que la mezcla se enfríe es menor que en una mezcla tradicional, por lo cual es indispensable exigir la utilización de un rodillo adicional.

c. Desde el punto de vista económico:

- Con los precios actuales de los asfaltos modificados con polímeros nuevos, las mezclas con polvo de caucho son una alternativa más económica. Si bien no se alcanza el grado de modificación reológica de los asfaltos modificados, este es suficiente para algunas aplicaciones y con un costo reducido; de manera que permiten un uso más amplio y asequible que tales mezclas.
- Se espera a medida que aumente el número de Empresas recicladoras de NFU que cumplan la certificación requerida para incorporar el polvo de caucho a las mezclas asfálticas (NCh 3258-2012), el precio de este insumo disminuya. De este modo, el costo de las mezclas asfálticas modificadas por vía seca se haría más cercano al de una mezcla asfáltica tradicional, pero con las ventajas ya señaladas.

6.3. Recomendaciones

- Realizar un seguimiento a largo plazo del estado de los pavimentos en ambos tramos de prueba confeccionados en este estudio, para analizar la evolución de sus condiciones tanto estructurales como funcionales en el tiempo, y estimar su vida útil.
- Se recomienda construir tramos experimentales adicionales que permitan ampliar la experiencia sobre la bondad del empleo de polvo de caucho incorporado de NFU por vía seca en mezclas asfálticas. Se recomienda también hacer un seguimiento del comportamiento en el tiempo de las secciones ejecutadas, con el objeto de facilitar la revisión de las recomendaciones y propuesta de especificaciones técnicas incluidas en este trabajo (Anexo A).
- Dado que los contenidos óptimos de ligante determinados para estas mezclas son mayores que en las mezclas convencionales, y el parámetro de fluidez determinado por el Método Marshall no es concluyente, se hace imprescindible realizar algún ensayo de ahuellamiento en Laboratorio que permita validar los mayores contenidos de asfalto utilizados, limitando idealmente los parámetros medidos a través de especificaciones. Hay que tener en cuenta la conveniencia de que en el ensayo escogido se cumpla también la especificación para contenidos de ligante superiores en un 0.3% del óptimo de la fórmula de trabajo. Se recomienda, para futuros tramos de prueba a construirse, en especial si se realizan con menores tiempos de digestión, ocupar una metodología de ensayo que cuente con especificaciones que permitan limitar los parámetros medidos.
- Realizar un estudio, a nivel de Laboratorio y terreno (confección y seguimiento de tramos de prueba), que compare de acuerdo a su comportamiento mecánico y servicialidad, a la mezcla asfáltica con polvo de caucho incorporado por vía seca, con los otros tipos de mezclas asfálticas modificadas, tanto las que se encuentran normalizadas en el Manual de Carreteras, con asfalto modificado con polímero y asfalto multigrado, como las mezclas con incorporación de polvo de caucho por vía húmeda (con asfalto-caucho).
- Analizar en laboratorio y verificar en terreno (tramos de prueba) el comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con caucho cuyo diseño involucre tiempos de digestión menores a los usados en este trabajo; de modo de ajustarse lo más cercano posible a los tiempos reales disponibles y que no se genere un gran encarecimiento de la mezcla.
- La viabilidad técnica de realizar pavimentos confeccionados con estas mezclas modificadas con polvo de caucho en Chile ya está constatada, no así la económica.

Para esto, desarrollar una evaluación económica, en cuanto a costos iniciales y de largo plazo (mantenimientos de los pavimentos), comparándolas con las mezclas convencionales durante la vida útil de las vías. Los mayores costos respecto a una mezcla tradicional hay que compararlos con los beneficios debidos a una prolongación de la vida de servicio.

- Actualmente a nivel nacional, los precios del polvo de caucho de NFU están casi al mismo nivel que el importado (granos de 0.1mm a 0.5mm de espesor: 0.56 EUR=\$378 y granos de 0.1mm a 0.8mm de espesor: 0.51 EUR=\$344¹⁵), pese al costo de transporte adicional asociados a ellos. Se debe fomentar la producción nacional para disminuir el precio del material con respecto al de importación, y por ende hacer económicamente más viable su utilización en mezclas asfálticas. Se debe instar a los organismos gubernamentales a favorecer la implantación de plantas recicladoras apoyando a las empresas interesadas y la instauración de normativas en relación a los proyectos de carreteras que obliguen el empleo del caucho proveniente de neumáticos desechados en la fabricación de mezclas asfálticas, siguiendo la línea de otros países.
- Es necesario validar en el Manual de Carreteras, el ensayo de Inmersión-Compresión y/o el de Sensibilidad al agua (Tracción indirecta tras inmersión), estableciendo el procedimiento de ensaye y los valores mínimos exigidos de resistencia conservada. Hay que tener en cuenta la conveniencia de que se cumpla también la especificación para un contenido de ligante inferior en 0.3% al óptimo de la fórmula de trabajo.
- Estudiar en Laboratorio, el efecto de la incorporación de polvo de caucho de NFU por vía seca en mezclas asfálticas para capas intermedias (binder).
- Estudiar la posibilidad de disminuir los espesores de las capas asfálticas confeccionadas con mezclas asfálticas modificadas con polvo de NFU por vía seca.
- Realizar mediciones del nivel de ruido generado por los vehículos al contacto con el pavimento y de retroreflectancia (contraste con las marcas viales) en futuras investigaciones, comparándolas con un pavimento convencional. Analizar la factibilidad de reciclar mezclas asfálticas fabricadas con polvo de caucho en el futuro, cuando se agote su capacidad de servicio.

¹⁵ <http://www.rubbercaucho.com>

BIBLIOGRAFÍA

- CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX). 2007. Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. Madrid, España.
- DIRECCION DE VIALIDAD, MOP. 2012. Manual de Carreteras, Volumen N° 5, Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. Santiago, Chile.
- DIRECCION DE VIALIDAD, MOP. 2012. Manual de Carreteras, Volumen N° 8, Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control. Santiago, Chile.
- ESPAÑA. MINISTERIO DE FOMENTO. 2008. Orden Circular 24/2008 sobre el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Artículo 542-Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso y Artículo 543-Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas. Madrid, España.
- GALLEGO, Juan (Universidad Politécnica de Madrid, España). 2008. Tecnologías de mezclas bituminosas con caucho de neumáticos. Experiencia y normativa española. En: XXXV REUNIÓN DEL ASFALTO. Rosario, Argentina.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. 2012. 1a. ed. corregida. NCh 3258-2012. Mezclas asfálticas. Polvo de caucho proveniente de Neumáticos Fuera de Uso. Requisitos. Santiago, Chile.
- LABORATORIO NACIONAL DE VIALIDAD, MOP. [s.a.]. Curso Laboratorista Vial. Volumen V. Mezclas Asfálticas. Santiago, Chile.
- LABORATORIO NACIONAL DE VIALIDAD, MOP. 2000. 5ª edición. Curso Laboratorista Vial. Volumen II. Asfalto. Santiago, Chile.
- LABORATORIO NACIONAL DE VIALIDAD, MOP. 2003. Ordinario N° 04630. Criterios técnicos para pavimentos en Rutas Concesionadas. Santiago, Chile.
- MORENO Chávez, Marcelo A. 2011. Efecto de la presencia de humedad en el comportamiento de mezclas asfálticas sometidas a ensayos de rueda de carga (Norma NLT-173/84). Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile.
- NORMA AASHTO. American Association of State Highway and Transportation Officials. T 324-04. Hamburg Wheel - Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA).
- NORMA NLT-161/98. Resistencia a la compresión simple de mezclas bituminosas.
- NORMA NLT-162/84. Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas compactadas.
- NORMA NLT-346/90. Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas.
- NORMA UNE-EN 12697-12: 2006. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12. Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa.
- NORMA UNE-EN 12697-23: 2004. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23. Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas.

- NORMA UNE-EN 12697-26: 2006. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26. Rigidez.
- RAMÍREZ Palma, Náyade I. 2006. Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile.
- RUBIO, Baltasar "et al". 2008. El ensayo europeo de sensibilidad al agua y su relación con los ensayos normalizados en España. España.
- SEGOVIA Airaudó, Raúl. 2007. Estudio del efecto de la variación en la granulometría del caucho en mezclas asfálticas por vía seca. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago, Chile. Universidad de Chile.
- THENOUX, Guillermo y CARRILLO, Héctor. 2002. Análisis de casos de ahuellamiento en mezclas asfálticas chilenas. Santiago, Chile.
- URRUTIA Torres, Ricardo. 2011. Evaluación cuantitativa del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas modificadas incorporando polvo de caucho de N.F.U. nacional mediante vía seca. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago, Chile. Universidad Andrés Bello.

ANEXO A
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MODIFICADAS CON POLVO DE CAUCHO MEDIANTE VÍA SECA PARA CAPAS DE RODADURA.

1. DESCRIPCIÓN Y ALCANCES

En esta Sección se definen los trabajos de construcción de capas de rodadura constituidas con mezclas asfálticas en caliente modificadas con polvo de caucho mediante el método de vía seca.

2. MATERIALES

2.1 Áridos

Los áridos deberán clasificarse y acopiarse separadamente en canchas habilitadas especialmente para este efecto, de manera que no se produzca contaminación ni segregación de los materiales. Además deberán ajustarse a los requisitos de 5.408.201 en el Volumen N° 5 del Manual de Carreteras.

2.1 (1) Fracción Gruesa

Corresponde a la fracción retenida en tamiz 2.5mm (ASTM N° 8) y deberá estar constituida por partículas, chancadas, limpias y tenaces que se ajusten a los requisitos que se indican en la Tabla 5.408.201.A para el tipo de mezcla que especifique el proyecto.

2.1 (2) Fracción Fina

Corresponde a la fracción que pasa por tamiz 2.5mm (ASTM N° 8), la cual deberá estar constituida por agregados provenientes de la trituración de rocas o gravas, las que deberán cumplir con las condiciones exigidas al árido grueso en la Tabla 5.408.201.A sobre Desgaste de los Ángeles. Sus partículas deberán ser duras, tenaces y libres de arcilla o sustancias perjudiciales. Estos áridos deberán cumplir con los requisitos exigidos en la Tabla 5.408.201.B.

2.1 (3) Polvo mineral (filler)

Si se requiere adicionar filler de aportación, éste deberá estar constituido por polvo mineral fino tal como cemento hidráulico, cal u otro material inerte de origen

calizo, libre de materia orgánica y partículas de arcilla, debiendo ajustarse a la granulometría señalada en la Tabla 5.408.201.C.

2.1 (4) Mezcla de áridos

Los áridos combinados deberán cumplir con los requisitos indicados en la Tabla 5.408.201.D. Las distintas fracciones de áridos deberán combinarse en proporciones tales que la mezcla resultante cumpla con alguna de las bandas granulométricas de tipo semidenso especificadas en la Tabla 5.408.201.F.

Cuando la dotación de polvo de caucho sea igual o inferior al 0.5% en peso de los áridos no será necesario tenerlo en cuenta para la elaboración de la granulometría conjunta de áridos. Para porcentajes superiores de polvo de caucho se deberá determinar la curva combinada de áridos y polvo de caucho, que deberá estar comprendida dentro de la banda granulométrica señalada. En la elaboración de la curva granulométrica combinada, se tendrán en cuenta las diferencias de densidad relativa entre el árido y el polvo de caucho (curva granulométrica volumétrica).

2.2 Asfalto

Se utilizarán cementos asfálticos del tipo CA – 24, los cuales deberán cumplir con los requisitos de la Tabla 8.301.1A del Volumen N° 8 del Manual de Carreteras.

2.3 Polvo de Caucho

El polvo de caucho triturado debe cumplir las exigencias de la Norma NCh 3258-2012 Mezcla asfáltica- Polvo de caucho proveniente de los neumáticos fuera de uso-Requisitos.

2.3 (1) Requisitos químicos

La composición química del polvo de caucho; propiedades indicadas en la Tabla a continuación, se debe informar al momento de entrega de la partida.

Composición	Método de ensaye
Extracto acetónico	UNE 53651
Cenizas	UNE 53543
Negro de carbono	UNE 53570
Azufre	ISO 6528 - 1 a 3
Caucho natural	ISO 5945

De forma adicional, el polvo de caucho debe tener un contenido máximo de cenizas de 18.5%.

2.3 (2) Requisitos físicos

- a. La densidad relativa de las partículas de caucho, determinada según UNE 53526, debe estar comprendida en el intervalo de 1.15 ± 0.05 .
- b. El contenido de agua debe ser menor que 0.75%. La determinación se debe realizar de acuerdo a NCh 1515, excepto en lo relativo a la temperatura de calentamiento en la estufa, que debe ser de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- c. La granulometría del polvo de caucho debe estar comprendida dentro de alguna de las bandas indicadas a continuación.

Tamiz		P - 1	P - 2	P - 3
ASTM	mm	% que pasa		
N° 8	2.30	100	-	-
N° 16	1.25	60 - 100	100	-
N° 30	0.63	30 - 80	40 - 100	100
N° 50	0.315	15 - 60	10 - 70	30 - 60
N° 100	0.160	0 - 40	2 - 40	0 - 30
N° 200	0.080	0 - 20	0 - 20	0 - 18

2.3 (3) Otros

- a. El contenido de materiales ferromagnéticos no debe ser mayor que 0.01% en peso del polvo de caucho. Para determinar este contenido, pasar repetidamente un imán sobre una muestra de polvo de caucho de 50g. Pesar y determinar el porcentaje del material atrapado por el imán.
- b. El contenido de materiales textiles no debe ser mayor que 0.5% en peso del polvo de caucho. Para determinar se debe retirar y pesar, durante el ensayo de granulometría, las aglomeraciones de textiles de cada tamiz. El peso de los materiales textiles no se debe considerar en la granulometría del polvo de caucho.

- c. El contenido de cualquier otro tipo de impurezas, tales como arena, madera, vidrio no debe ser mayor que 0.25% en peso del polvo de caucho. Los contaminantes minerales se deben determinar por separación en solución salina. Para ello, se debe dispersar una muestra de 50g de polvo de caucho en 1L de agua salina, compuesta por una parte de sal común en tres partes de agua destilada. Dejar reposar un tiempo no menor que 30 min. Se debe considerar como contaminante mineral todo el material que no flote en el agua.

Cada partida debe venir acompañada de una hoja de características, en la que conste, a lo menos, los datos siguientes:

- a. Composición química.
- b. Curva granulométrica.
- c. Contenido de humedad.
- d. Contenido de partículas metálicas.
- e. Contenido de fibras.
- f. Contenido de otros contaminantes.
- g. Densidad relativa.

3. PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON POLVO DE CAUCHO

El Contratista deberá presentar al Inspector Fiscal, la dosificación de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho antes de comenzar la pavimentación y siempre que tenga producidos como mínimo el 20% de los agregados pétreos a utilizar en la temporada.

La dosificación deberá ser visada por el Laboratorio de Vialidad en un plazo máximo de 25 días desde la fecha de recepción de la solicitud del Inspector Fiscal. El Contratista, sólo podrá comenzar la colocación de las mezclas asfálticas cuando haya recibido la visación correspondiente. Si transcurrido el plazo de 25 días antes señalado, el inspector Fiscal no hubiese recibido la respuesta a la dosificación presentada, éste podrá autorizar el inicio de la ejecución de esta partida de la obra.

3.1 Dosificación

Las propiedades de las mezclas asfálticas se determinarán en probetas preparadas en Laboratorio como se indica a continuación:

- a. Establecer los porcentajes de caucho y asfalto que se van a utilizar, referidos al peso del agregado, y el tiempo y la temperatura a la que se llevará a cabo el

proceso de digestión. Estos parámetros se definen mediante la evaluación de la resistencia conservada a la acción del agua, determinada en ensayo de Inmersión – Compresión según Norma NLT-162 complementada con Norma NLT-161, o equivalentemente, en ensayo de Sensibilidad al agua (Tracción indirecta tras inmersión) a temperatura de ensayo de 15°C según Norma UNE-EN 12697-12, complementada con Norma UNE-EN 12697-23.

- b.** Combinar las distintas fracciones de áridos para la obtención de la granulometría proyectada (granulometría de diseño).
- c.** Calentar los agregados en horno a la temperatura de mezclado y pesar la cantidad de caucho a utilizar. La temperatura de mezclado se fija igual a la temperatura de digestión.
- d.** Mezclar los agregados calientes con la cantidad de caucho que corresponda y colocarlos en horno a la temperatura de digestión por aproximadamente 5 minutos para que el caucho aumente su temperatura.
- e.** Adicionar a la mezcla de agregados con caucho, el asfalto previamente calentado a la temperatura de digestión, y mezclar por 2 a 3 minutos.
- f.** Colocar la mezcla asfáltica en horno para el proceso de digestión, durante el tiempo y a la temperatura definidos con anterioridad.
- g.** Retirar la mezcla del horno y remover el material.
- h.** Compactar en moldes precalentados la mezcla a una temperatura 10 °C más baja que la de digestión. La preparación de probetas varía según método de ensayo; para ensayo de Inmersión Compresión (a presión) se realiza según Norma NLT-162 y para ensayo de sensibilidad al agua se realiza según el Método descrito en 8.302.40 del M.C-V.8, con 50 golpes por cara con el Martillo Marshall.
- i.** Dejar reposar por 24 horas antes de extraer la probeta del molde. Remover la probeta a temperatura ambiente.

La dosificación de la mezcla para capa de rodadura se realizará mediante el Método Marshall descrito en la Sección 8.302.47 del Volumen N° 8 del Manual de Carreteras, previa determinación de los mínimos requeridos de temperatura y tiempo de digestión (para los contenidos de asfalto y polvo de caucho definidos), y debe cumplir con lo indicado en las Tablas 5.408.203.A y 5.408.203.B del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras.

La mezcla asfáltica deberá cumplir además con los requisitos que se indican en la siguiente tabla.

Requisito	Exigencia
Contenido de caucho c/r al peso del agregado [%]	0.5 – 1.0
Tiempo de Digestión [hrs.]	Informar
Temperatura de Digestión [hrs.]	Informar
IRC [%] (1)	Mín. 75
ITSR [%] (2)	Mín. 85

(1) Índice de Resistencia Conservada en ensaye de Inmersión Compresión (25°C) según Norma NLT-162, complementada con norma NLT-161.

(2) Índice de Resistencia Conservada a 15°C en ensaye de Tracción indirecta tras inmersión según Norma UNE-EN 12697-12, complementada con Norma UNE-EN 12697-23 (probetas compactadas por impacto con 50 golpes por cara).

En la fórmula de trabajo, además de lo indicado en 8.302.47 del Volumen N°8 del Manual de Carreteras, deberá quedar establecido el tiempo mínimo que debe transcurrir entre la fabricación de la mezcla y la puesta en obra (tiempo de digestión), que no será inferior en ningún caso a 60 min.

Además de la fórmula de trabajo, se deben incluir los datos relativos a las variaciones de las características de la mezcla con contenidos de asfalto de $\pm 0.3\%$, con respecto al contenido óptimo.

El tiempo de mezclado se deberá aumentar, respecto al de una mezcla convencional, para garantizar el mezclado homogéneo del polvo de caucho con los áridos y la envuelta con el asfalto.

4. PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

4.1 Preparación de la Superficie

Antes de iniciar las faenas de colocación de las mezclas asfálticas, se deberá verificar que la superficie satisfaga los requerimientos establecidos en la Sección 5.401, Imprimación, si corresponde a una base granular o de la Sección 5.402, Riego de Liga, si corresponde a un pavimento.

4.2 Producción de las Mezclas

Deberá regirse por lo indicado en 5.408.302, de la Sección 5.408 “Mezclas Asfálticas en Caliente”, teniendo presente que el polvo de caucho se incorpora a los áridos y el polvo mineral ya caliente y luego se procede a una primera homogenización durante un tiempo adecuado. A continuación se introducirá el ligante asfáltico para cada

cantidad de mezcla a producir, y se continuará la operación de mezcla durante el tiempo especificado en la fórmula de trabajo.

4.2 (a) Características de la Planta Mezcladora

La mezcla será preparada en plantas de tambor, continuas o discontinuas que permitan reproducir las dosificaciones y mezclas con las características exigidas en 5.408.302(2) de la Sección 5.408 “Mezclas Asfálticas en Caliente”.

Estas deben estar adicionalmente provistas de dosificadores ponderales para el polvo de caucho, cuya precisión sea superior al tres por mil ($\pm 0.3\%$).

4.2 (b) Controles

Durante el proceso de preparación de las mezclas asfálticas, se deberán efectuar los controles indicados en 5.408.302(3) del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras, además de lo siguiente:

- Granulometría del caucho.
- Cantidad de caucho incorporado.
- Temperatura y tiempo de digestión.

La temperatura de los áridos y del cemento asfáltico debe estar de acuerdo a la formulación en Laboratorio.

La temperatura máxima de la mezcla al salir del mezclador no será inferior a ciento setenta grados Celsius (170°C) ni superior a ciento noventa grados Celsius (190°C). La temperatura mínima de la mezcla al salir del mezclador debe ser aprobada por el Inspector Fiscal, de forma que la temperatura de la mezcla en la descarga de los camiones sea superior al mínimo fijado.

La tolerancia admisible, respecto de la dotación de asfalto de la fórmula de trabajo (corregido con los correspondientes factores de corrección previamente establecidos en Laboratorio) será del tres por mil ($\pm 0.3\%$) en masa, del total de áridos (incluido el polvo mineral).

4.3 Transporte y Colocación

4.3 (a) Requisitos Generales

Se regirá por lo establecido en 5.408.303(1) de la Sección 5.408 Mezclas Asfálticas en Caliente, en lo que no se contraponga con lo indicado en este punto.

Durante el Transporte los camiones tolva deben estar cubiertos con lonas o cobertores que aseguren un buen aislamiento térmico de la mezcla con el medio ambiente.

Cuando la temperatura ambiente a la sombra, sea inferior a 12 grados Celsius (12 °C), con tendencia a disminuir, no se permitirá la puesta en obra de la mezcla.

Antes de verter la mezcla del elemento de transporte a la tolva de la extendidora, se comprobará su aspecto y se medirá su temperatura. También se verificará que se ha cumplido el periodo de digestión establecido en la fórmula de trabajo.

4.3 (b) Compactación

Se regirá por lo establecido en 5.408.303(2) de la Sección 5.408 Mezclas Asfálticas en Caliente, en lo que no se contraponga con lo indicado en este punto.

Los rodillos deben seguir muy de cerca a la terminadora. La compactación se realizará según el plan aprobado por el Inspector Fiscal; se deberá hacer a la mayor temperatura posible, sin rebasar la máxima prescrita en la fórmula de trabajo.

4.3 (c) Apertura al Tránsito

La apertura al tránsito deberá realizarse cuando la mezcla alcance la temperatura ambiente.

4.4 Tolerancias y Multas

4.4 (a) Macrotextura superficial y Coeficiente de Fricción

La superficie de la capa deberá presentar una textura homogénea, uniforme y exenta de segregaciones. Únicamente a efectos de recepción de capas de rodadura, la macrotextura superficial y la resistencia al deslizamiento, no deberán ser inferiores a los valores indicados en 5.408.303(3)a) y en 5.408.303(3)b) de la Sección 5.408 Mezclas Asfálticas en Caliente.

4.4 (b) Compactación

Una vez esparcidas, enrasadas y alisadas las irregularidades de la superficie, la compactación de una capa asfáltica se controla a partir de la medición de la densidad, según el Método descrito en la Sección 8.302.38 del Volumen N° 8 del Manual de Carreteras. La medición se realiza a partir de testigos extraídos del pavimento de acuerdo a los criterios señalados en 5.408.304 de la Sección 5.408 Mezclas Asfálticas en Caliente (frecuencia de muestreo), y es evaluado según el Numeral 5.408.304(1).

4.4 (c) Espesor

El espesor de una capa asfáltica se controla a partir de la medición del espesor, según el Método descrito en 8.302.41 del Volumen N° 8 del Manual de Carreteras. La medición se realiza a partir de testigos extraídos del pavimento de acuerdo a los criterios señalados en 5.408.304 de la Sección 5.408 Mezclas Asfálticas en Caliente, y es evaluado según el Numeral 5.408.304(2).

4.4 (d) Contenido de Asfalto

La dotación de asfalto en conjunto con la del polvo de caucho se determinará, en relación al peso del agregado, con el Método descrito en 8.302.36 del M.C.-V.8 o con el Método de Ignición descrito en 8.302.56 del M.C.-V.8. La dotación del cemento asfáltico (corregido con los correspondientes coeficientes de calibración previamente establecidos en Laboratorio) se evalúa según el procedimiento descrito en el Numeral 5.408.304(3) de la Sección 5.408 del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras.

4.4 (e) Control de Rugosidad (IRI)

La evaluación del IRI se realizará según el procedimiento descrito en 5.408.304(5) de la Sección 5.408 del Volumen N° 5 del Manual de Carreteras.

ANEXO B
DISEÑO MARSHALL EMPRESA

- **Tramo de Prueba II**

Contrato: Mejoramiento Ruta F-50, Sector Lo Orozco-Quilpué, Tramo Km 17.578- Km 29.498, Provincia de Marga-Marga, Región de Valparaíso.

% Caucho	0.5% r.a.
Tiempo de Digestión	2 horas
T° Digestión	170°C
T° Compactación	160°C
N° Golpes	2*75

Parámetros	Unidad	Valores				
Asfalto	% r.a.	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Estabilidad	N	11985	12965	13959	14132	13738
Fluencia	0.01"	10.3	11.5	12.4	13.7	14.9
Huecos en la mezcla	%	9.5	8.3	6.8	6	5.6
Vacios en el agregado mineral	%	17.3	17.2	16.9	17.1	17.7
Densidad	kg/m ³	2278	2292	2312	2317	2311
DMM	kg/m ³	2516	2498	2481	2464	2447

Óptimo de Cemento Asfáltico		
% Cemento para máx. Densidad	2317 kg/m ³	5.37 % r.a.
% Cemento para máx. Estabilidad	14132 N	5.35 % r.a.
% Huecos	6.0 %	5.45 % r.a.
% CA óptimo promedio		5.4% r.a.

ANEXO C
PARÁMETROS MARSHALL

C.1.- Contrato: Reposición Ruta G-184, Sector El Noviciado, Tramo Km 0.077 al Km 5.400, Comuna de Pudahuel, Provincia de Santiago, Región Metropolitana.

a. Tramo con mezcla asfáltica convencional (sin caucho):

% Asfalto óptimo	5.1% r.a.
T° Mezclado	160°C
T° Compactación	145°C
N° Golpes	2*75

N°	8.302.41: Espesor de mezclas asfálticas compactadas					8.302.38: Densidad real de mezclas asfálticas compactadas			
	X1	X2	X3	X4	Promedio	Peso Seco	Peso S.S.S.	Peso Agua	Densidad
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm]	[g]	[g]	[g]	[kg/m3]
1	61.7	61.6	61.6	61.7	61.7	1144.3	1149.0	661.9	2349
2	61.9	62.0	61.9	61.8	61.9	1145.3	1151.3	662.1	2341
3	62.0	62.2	62.0	62.0	62.0	1144.2	1147.9	659.5	2343
								Promedio	2344

8.302.40: Medición de fluidez y estabilidad de las probetas				
N°	Fluidez	Estabilidad dial	Factor Altura	Estabilidad
	[0.25mm]	[N]		[N]
1	16	12540	1.049	13154
2	15	11330	1.043	11817
3	16	10692	1.040	11120
Promedio	16			12031

8.302.37: Densidad máxima de la mezcla.					
Masa Seca Muestra	Masa Matraz + Agua	Masa Total Matraz	T°	ρ_w	DMM
[g]	[g]	[g]	[C°]	[kg/m3]	[kg/m3]
1970	3345	4525	26	996.8	2486

b. Tramo de Prueba I:

% Caucho	0.5% r.a.
Tiempo de Digestión	2 horas
T° Digestión	170°C
T° Compactación	160°C
N° Golpes	2*75

N°	8.302.41: Espesor de mezclas asfálticas compactadas					8.302.38: Densidad real de mezclas asfálticas compactadas			
	X1	X2	X3	X4	Promedio	Peso Seco	Peso S.S.S.	Peso Agua	Densidad
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[kg/m3]
1	62.9	63.1	63.0	62.9	63.0	1148.4	1152.3	656.8	2318
2	62.0	62.2	62.0	62.0	62.1	1149.7	1153.5	657.2	2316
3	63.2	63.3	63.2	63.3	63.3	1149.8	1154.7	656.1	2306
								Promedio	2313

8.302.40: Medición de fluidez y estabilidad de las probetas				
N°	Fluidez	Estabilidad dial	Factor Altura	Estabilidad
	[0.25mm]	[N]		[N]
1	12	13259	1.013	13431
2	13	15670	1.037	16250
3	12	13338	1.005	13405
Promedio	12			14362

8.302.37: Densidad máxima de la mezcla.					
Masa Seca Muestra	Masa Matraz + Agua	Masa Total Matraz	T°	ρ_w	DMM
[g]	[g]	[g]	[C°]	[kg/m3]	[kg/m3]
1987	7394	8577	25	997.1	2464

- **C.2.-Contrato: Mejoramiento Ruta F-50, Sector Lo Orozco-Quilpué, Tramo Km 17.578- Km 29.498, Provincia de Marga-Marga, Región de Valparaíso.**

a. Tramo con mezcla asfáltica convencional (sin caucho):

% Asfalto óptimo	5.1% r.a.
T° Mezclado	160°C
T° Compactación	145°C
N° Golpes	2*75

N°	8.302.41: Espesor de mezclas asfálticas compactadas					8.302.38: Densidad real de mezclas asfálticas compactadas			
	X1	X2	X3	X4	Promedio	Peso Seco	Peso S.S.S.	Peso Agua	Densidad
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[kg/m3]
1	61.1	61.1	61.4	61.1	61.2	1140.5	1142.0	659.8	2365
2	60.7	60.9	60.9	60.9	60.9	1144.3	1144.8	662.2	2371
3	60.6	60.6	60.9	60.8	60.7	1146.3	1147.6	665.3	2377
								Promedio	2371

8.302.40: Medición de Fluidéz y Estabilidad de las probetas				
N°	Fluidéz	Estabilidad dial	Factor Altura	Estabilidad
	[0.25mm]	[N]		[N]
1	15	9173	1.065	9769
2	15	11158	1.074	11984
3	18	10556	1.081	11411
Promedio	16			11055

8.302.37: Densidad Máxima de la Mezcla.					
Masa Seca Muestra	Masa Matraz + Agua	Masa Total Matraz	T°	ρ_w	DMM
[g]	[g]	[g]	[C°]	[kg/m3]	[kg/m3]
2078	7394	8640	24	997.3	2491

b. Tramo de Prueba II:

% Caucho	0.5% r.a.
Tiempo de Digestión	2 horas
T° Digestión	170°C
T° Compactación	160°C
N° Golpes	2*75

N°	8.302.41: Espesor de mezclas asfálticas compactadas					8.302.38: Densidad real de mezclas asfálticas compactadas			
	X1	X2	X3	X4	Promedio	Peso Seco	Peso S.S.S.	Peso Agua	Densidad
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[kg/m3]
1	62.3	62.4	62.4	62.3	62.4	1152.9	1158.8	663.3	2327
2	62.1	62.3	62.4	62.3	62.3	1149.5	1154.2	658.8	2320
3	62.4	62.2	62.4	62.4	62.4	1147.9	1152.8	659.8	2328
								Promedio	2325

8.302.40: Medición de fluidez y estabilidad de las probetas				
N°	Fluidez	Estabilidad dial	Factor Altura	Estabilidad
	[0.25mm]	[N]		[N]
1	16	16598	1.029	17079
2	16	14269	1.032	14726
3	16	13127	1.029	13508
Promedio	16			15104

8.302.37: Densidad máxima de la mezcla.					
Masa Seca Muestra	Masa Matraz + Agua	Masa Total Matraz	T°	ρ_w	DMM
[g]	[g]	[g]	[C°]	[kg/m3]	[kg/m3]
2105	7394	8646	26	996.8	2460

c. Mezcla asfáltica convencional (sin caucho):

% Asfalto	5.4% r.a.				
T° Mezclado	160°C				
T° Compactación	145°C				
Probeta	1	3	3	Unidad	
Altura probetas	63.2	61.6	61.4	mm	
Factor de corrección por altura	1.008	1.053	1.049		
Fluidez lectura dial	16	16	16	0.25mm	
	16				
Estabilidad	Lectura dial	10426	9774	10682	N
	Corregida	10509	10291	11205	
	Promedio	10669			
DMM	2481			kg/m ³	
Densidad Marshall	2353			kg/m ³	

d. Mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho con 1 hora de digestión:

% Asfalto	5.4% r.a.				
% Caucho	0.5% r.a.				
Tiempo de Digestión	1 hora				
T° Digestión	170°C				
T° Compactación	160°C				
Probeta	1	2	3	Unidad	
Altura probetas	62.4	61.3	61.5	mm	
Factor de corrección por altura	1.029	1.056	1.062		
Fluidez lectura dial	16	16	16	0.25mm	
	16				
Estabilidad	Lectura dial	14822	13972	14993	N
	Corregida	15252	14755	15923	
	Promedio	15310			
DMM	2452			kg/m ³	
Densidad Marshall	2354			kg/m ³	

ANEXO D
INMERSIÓN-COMPRESIÓN

0.5%. Caucho; 5.1% Asfalto; Digestión a 170°C por 2 horas								
Grupo	N°	Diámetro	Altura	Densidad	Carga	Tensión de Rotura		IRC
		[mm]	[mm]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]	
Secas	1	101.8	110.7	2268	28	3.44	3.93	66
	4	101.9	109.9	2278	37	4.54		
	3	101.8	110.4	2273	31	3.81		
Sumergidas	2	101.8	110.6	2256	20	2.46	2.58	
	5	101.8	110.7	2264	23	2.83		
	6	101.8	110.9	2251	20	2.46		

0.5%. Caucho; 5.1% Asfalto; Digestión a 170°C por 1 ½ horas								
Grupo	N°	Diámetro	Altura	Densidad	Carga	Tensión de Rotura		IRC
		[mm]	[mm]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]	
Secas	1	101.7	110.3	2272	35	4.31	4.26	56
	4	101.8	110.3	2272	34	4.18		
	3	101.8	110.3	2277	35	4.30		
Sumergidas	2	101.7	110.7	2263	19	2.34	2.38	
	5	101.8	111.1	2265	21	2.58		
	6	101.8	110.8	2261	18	2.21		

ANEXO E
SENSIBILIDAD AL AGUA Y TRACCIÓN INDIRECTA

a. Contrato: Reposición Ruta G-184, Sector El Noviciado, Tramo Km 0.077 al Km 5.400, Comuna de Pudahuel, Provincia de Santiago, Región Metropolitana.

5.1% Asfalto; 0.5% Caucho; Digestión a 165°C por 1 ½ hrs.									
Estado	N°	Densidad		Diámetro	Altura	ITS			ITSR
		Densidad	Promedio			Carga Máx.	ITS	Promedio	
		[kg/m3]	[kg/m3]			[kN]	[MPa]	[MPa]	
Seco	4	2290	2290	101.6	64.4	20.879	2.03	2.04	78
	5	2279		101.6	64.8	20.121	1.95		
	6	2302		101.6	63.7	21.638	2.13		
Húmedo	1	2307	2309	101.7	63.4	16.131	1.59	1.60	
	2	2308		101.6	63.9	15.093	1.48		
	3	2311		101.7	63.2	17.297	1.71		

5.1% Asfalto; 0.5% Caucho; Digestión a 165°C por 2 hrs									
Estado	N°	Densidad		Diámetro	Altura	ITS			ITSR
		Densidad	Promedio			Carga Máx.	ITS	Promedio	
		[kg/m3]	[kg/m3]			[kN]	[MPa]	[MPa]	
Seco	6	2261	2292	101.7	64.7	21.475	2.08	2.03	79
	1	2263		101.5	64.5	21.108	2.05		
	1	2286		101.7	63.9	18.196	1.78		
	2	2302		101.5	63.9	20.619	2.02		
	10	2303		101.5	63.5	19.811	1.96		
	8	2310		101.6	63.0	19.721	1.96		
	4	2318		101.5	62.9	23.602	2.35		
Húmedo	7	2303	2300	101.5	63.6	16.004	1.58	1.61	
	5	2315		101.5	62.9	16.608	1.66		
	9	2318		101.3	63.4	16.317	1.62		
	2	2279		101.6	64.0	16.288	1.59		
	4	2285		101.8	63.7	13.930	1.37		
	3	2301		101.8	63.5	18.850	1.86		

5.1% Asfalto; 0.5% Caucho; Digestión a 170°C por 1 ½ hrs.									
Estado	N°	Densidad		Diámetro	Altura	ITS			ITSR
		Densidad	Promedio			Carga Máx.	ITS	Promedio	
		[kg/m3]	[kg/m3]						
Seco	8	2292	2308	101.6	62.9	19.779	1.97	1.96	78
	12	2313		101.6	63.5	19.807	1.95		
	10	2320		101.6	63.1	19.793	1.97		
Húmedo	9	2259	2267	101.5	62.4	15.566	1.56	1.54	
	7	2266		101.5	64.1	15.412	1.51		
	11	2276		101.6	63.5	15.720	1.55		

5.1% Asfalto; 0.5% Caucho; Digestión a 170°C por 2 hrs.									
Estado	N°	Densidad		Diámetro	Altura	ITS			ITSR
		Densidad	Promedio			Carga Máx.	ITS	Promedio	
		[kg/m3]	[kg/m3]						
Seco	20	2283	2290	101.5	63.9	18.872	1.85	1.99	81
	15	2286		101.5	63.7	18.550	1.82		
	5	2291		101.5	63.5	21.796	2.15		
	6	2301		101.6	63.2	21.502	2.13		
Húmedo	16	2313	2291	101.6	62.9	15.222	1.52	1.61	
	2	2274		101.5	63.8	16.783	1.65		
	4	2286		101.6	63.7	16.905	1.66		

5.3% Asfalto; 0.5% Caucho; Digestión a 170°C por 2 hrs.									
Estado	N°	Densidad		Diámetro	Altura	ITS			ITSR
		Individual	Promedio			Carga Máx.	ITS	Promedio	
		[kg/m3]	[kg/m3]						
Seco	5	2270	2285	101.47	64.33	19.641	1.92	2.01	91
	3	2290		101.48	63.60	19.706	1.94		
	4	2295		101.58	63.52	22.071	2.18		
Húmedo	6	2283	2287	101.55	63.65	17.748	1.75	1.82	
	1	2284		101.57	63.59	19.465	1.92		
	2	2294		101.55	63.24	18.185	1.80		

b. Contrato: Mejoramiento Ruta F-50, Sector Lo Orozco-Quilpué, Tramo Km 17.578- Km 29.498, Provincia de Marga-Marga, Región de Valparaíso.

5.1% Asfalto; 0.5% Caucho; Digestión a 170°C por 2 hrs.									
Estado	N°	Densidad		Diámetro	Altura	ITS			ITSR
		Densidad	Promedio			Carga Máx.	ITS	Promedio	
		[kg/m3]	[kg/m3]						
Seco	2	2256	2263	101.6	64.8	16.880	1.63	1.67	75
	5	2258		101.6	64.6	17.361	1.69		
	1	2275		101.6	64.8	17.449	1.69		
Húmedo	4	2268	2268	101.7	64.9	12.829	1.24	1.25	
	3	2263		101.6	64.3	13.017	1.27		
	6	2274		101.6	64.3	12.642	1.23		

5.3% Asfalto; 0.5% Caucho; Digestión a 170°C por 2 hrs.									
Estado	N°	Densidad		Diámetro	Altura	ITS			ITSR
		Densidad	Promedio			Carga Máx.	ITS	Promedio	
		[kg/m3]	[kg/m3]						
Seco	5	2270	2272	101.7	64.8	17.594	1.70	1.74	94
	7	2287		101.7	64.5	18.983	1.84		
	10	2260		101.5	62.4	16.942	1.70		
	12	2269		101.7	64.5	17.740	1.72		
Húmedo	4	2265	2272	101.6	64.8	17.453	1.69	1.64	
	6	2260		101.7	64.5	16.329	1.58		
	8	2270		101.6	64.6	16.831	1.63		
	9	2275		101.6	64.4	16.703	1.63		
	11	2288		101.6	64.5	17.215	1.67		

5.4% Asfalto; 0.5% Caucho; Digestión a 170°C por 2 hrs.									
Estado	N°	Densidad		Diámetro	Altura	ITS			ITSR
		Densidad	Promedio			Carga Máx.	ITS	Promedio	
		[kg/m3]	[kg/m3]						
Seco	3	2281	2271	101.7	64.1	17.718	1.73	1.71	98
	4	2261		101.7	65.1	17.502	1.68		
	2	2271		101.7	64.6	17.610	1.71		
Húmedo	1	2278	2272	101.7	64.4	19.107	1.86	1.68	
	5	2283		101.7	64.5	18.115	1.76		
	6	2255		101.7	65.6	14.864	1.42		

5.5% Asfalto; 0.5% Caucho; Digestión a 170°C por 2 hrs.									
Estado	N°	Densidad		Diámetro	Altura	ITS			ITSR
		Densidad	Promedio			Carga Máx.	ITS	Promedio	
		[kg/m3]	[kg/m3]			[kN]	[MPa]	[MPa]	
Seco	1	2301	2321	101.7	63.0	19.539	1.94	1.95	98
	3	2325		101.6	62.5	19.605	1.97		
	5	2338		101.7	62.7	19.572	1.95		
Húmedo	2	2304	2315	101.6	63.2	18.498	1.84	1.92	
	4	2341		101.7	62.0	20.624	2.08		
	6	2300		101.6	63.3	18.661	1.85		

5.4% Asfalto; 0.5% Caucho; Digestión a 170°C por 1 ½ hrs.									
Estado	N°	Densidad		Diámetro	Altura	ITS			ITSR
		Densidad	Promedio			Carga Máx.	ITS	Promedio	
		[kg/m3]	[kg/m3]			[kN]	[MPa]	[MPa]	
Seco	5	2298	2289	101.7	63.4	18.578	1.83	1.76	100
	8	2293		101.6	64.6	18.798	1.82		
	9	2275		101.7	64.7	16.690	1.61		
Húmedo	4	2277	2288	101.7	64.4	17.118	1.66	1.76	
	6	2286		101.8	63.9	18.384	1.80		
	7	2300		101.8	64.2	18.560	1.81		

5.4% Asfalto; 0.5% Caucho; Digestión a 170°C por 1 hora									
Estado	N°	Densidad		Diámetro	Altura	ITS			ITSR
		Densidad	Promedio			Carga Máx.	ITS	Promedio	
		[kg/m3]	[kg/m3]			[kN]	[MPa]	[MPa]	
Seco	7	2329	2331	101.7	62.8	19.074	1.90	2.03	103
	8	2333		101.6	63.0	21.772	2.17		
	5	2331		101.7	62.9	20.423	2.03		
Húmedo	4	2334	2330	101.7	63.2	20.696	2.05	2.08	
	6	2335		101.8	62.8	21.795	2.17		
	9	2322		101.7	63.6	20.653	2.03		

ANEXO F
COMPRESIÓN DIAMETRAL.

- **Contrato: Reposición Ruta G-184, Sector El Noviciado, Tramo Km 0.077 al Km 5.400, Comuna de Pudahuel, Provincia de Santiago, Región Metropolitana.**

5.3%r.a. Asfalto; 0.5%r.a; Caucho; Digestión a 170°C por 2 horas						
N°	Diámetro Promedio	Altura Promedio	Densidad	Carga Rotura		Compresión Diametral R _T
	[mm]			[kg/m ³]	Lectura	
1C	101.6	62.2	2327	2894	12.7	1.28
2C	101.6	62.3	2318	2815	12.4	1.24
3C	101.6	62.8	2322	2944	12.9	1.29
					Promedio	1.27

5.3%r.a. Asfalto (sin caucho); Mezclado a 160°C; Compactación a 145°C						
N°	Diámetro Promedio	Altura Promedio	Densidad	Carga Rotura		Compresión Diametral R _T
	[mm]			[kg/m ³]	Lectura	
1SC	101.7	61.4	2346	2213	9.7	0.99
2SC	101.7	61.7	2355	2070	9.1	0.92
3SC	101.6	61.8	2347	2163	9.5	0.96
					Promedio	0.96

ANEXO G
MÓDULO RESILIENTE

- **Contrato Reposición Ruta G-184, Sector El Noviciado.**

Tipo de Mezcla	N°	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Módulo Resiliente			T° [°C]	MR [MPa]
				Medido	Ajustado	Promedio		
				[MPa]	[MPa]	[MPa]		
Sin Caucho 5.3% Asfalto	1SC	101.7	61.4	6487	6535	6462	15	6130
				6355	6389			
	2SC	101.7	61.7	6233	6269	6143		
				5087	6016			
	3SC	101.6	61.8	5947	5972	5786		
				5577	5600			
	1SC	101.7	61.4	2287	2300	2223	25	1937
				2140	2145			
	2SC	101.7	61.7	1912	1918	1908		
				1894	1898			
	3SC	101.6	61.8	1773	1772	1680		
				1586	1587			
Caucho 2h 5.3% Asfalto 0.5% Caucho; Digestión a 170°C por 2 hrs.	1C	101.6	62.2	9081	9102	9149	15	9130
				9182	9196			
	2C	101.6	63.3	9470	9495	9192		
				8877	8888			
	3C	101.6	62.8	9096	9111	9050		
				8973	8988			
	1C	101.6	62.2	3886	3888	3931	25	4029
				3978	3973			
	2C	101.6	63.3	4028	4035	4100		
				4160	4165			
	3C	101.6	62.8	4217	4223	4057		
				3889	3891			

- **Contrato: Mejoramiento Ruta F-50, Lo Orozco-Quilpué.**

Tipo de Mezcla	N°	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Módulo Resiliente			T° [°C]	MR [MPa]				
				Medido	Ajustado	Promedio						
				[MPa]	[MPa]	[MPa]						
Sin Caucho 5.4% Asfalto	1SC	101.6	60.8	5592	5633	5485	15	5410				
				5313	5337							
	2SC	101.6	61.6	5545	5558	5476			25	1859		
				5392	5394							
	3SC	101.7	61.4	5367	5382	5268					25	1859
				5145	5154							
	1SC	101.6	60.8	1752	1767	1969	25	1859				
				2162	2171							
	2SC	101.6	61.6	1907	1909	1869			25	1859		
				1826	1828							
	3SC	101.7	61.4	1898	1737	1740					25	1859
				1737	1743							
Caucho 2h 5.4% Asfalto 0.5% Caucho; Digestión a 170°C por 2 hrs.	1C	101.6	62.1	9151	9178	8856	15	8267				
				8501	8533							
	2C	101.6	62.0	8142	8177	8109			25	4023		
				8022	8040							
	3C	101.6	61.5	8010	8041	7838					25	4023
				7610	7634							
	1C	101.6	62.1	4352	4351	4273	25	4023				
				4195	4195							
	2C	101.6	62.0	3864	3866	3876			25	4023		
				3879	3886							
	3C	101.6	61.5	3912	3914	3919					25	4023
				3924	3923							
Caucho 1h 5.4% Asfalto 0.5% Caucho; Digestión a 170°C por 1 hora	1C1h	101.7	62.4	6669	6708	6697	15	7174				
				6665	6686							
	2C1h	101.7	61.3	6960	6941	7357			25	2845		
				7799	7772							
	3C1h	101.7	61.5	7501	7509	7469					25	2845
				7422	7429							
	1C1h	101.7	62.4	2846	2861	2825	25	2845				
				2783	2788							
	2C1h	101.7	61.3	2714	2712	2743			25	2845		
				2764	2773							
	3C1h	101.7	61.5	3010	3009	2967					25	2845
				2926	2924							

ANEXO H
CONTENIDO DE ASFALTO DE MUESTRAS ASFÁLTICAS

- **Método de Ignición: 8.302.56 del M.C.-V.8**

Contrato: Reposición Ruta G-184 Sector el Noviciado	Km	Masa Muestra [g]			Pérdida [% r.a.]		Tipo de Mezcla asfáltica
		Inicial	Perdida	Final			
Pista N° 1 + Berma	0.250	1989.0	96.9	1892.1	5.12	5.36	Modificada con polvo de caucho
	0.250	2025.0	110.3	1914.7	5.76		
	0.250	1946.0	96.1	1849.9	5.20		
	0.340	2400.0	127.7	2272.3	5.62		
Pista N° 2	0.370	2034.0	115.8	1918.2	6.03		
	0.300	2400.0	124.6	2275.4	5.48		
Berma Izquierda	0.150	2400.0	125.4	2274.6	5.51		
Factor de Corrección por agregado+ caucho	-	1989.0	118.3	1870.7	6.32		
Factor de Corrección por agregado+ caucho	-	1708.0	100.9	1607.1	6.28		
Factor de Corrección por Agregado	-	2195.0	6.2	2188.8	0.28		

Contrato: Mejoramiento Ruta F-50, Sector Lo Orozco-Quilpué	Km	Masa Muestra [g]			Pérdida [% r.a.]		Tipo de Mezcla asfáltica
		Inicial	Perdida	Final			
Pista N° 1	19.600	2401.0	124.6	2276.4	5.47	Modificada con polvo de caucho	
	19.640	2229.0	117.3	2111.7	5.56		
	19.670	2230.0	112.8	2117.2	5.33		
	18.700	2106.0	106.3	1999.7	5.31	Tradicional	
	18.900	2345.0	121.2	2223.8	5.45		
	19.050	2145.0	105.7	2039.3	5.18		
Pista N° 2	19.620	1930.0	105.0	1825.0	5.75	Modificada con polvo de caucho	
	19.720	2133.0	118.5	2014.5	5.88		
	19.780	2074.0	110.7	1963.3	5.64		
	18.500	2116.0	109.3	2006.7	5.45	Tradicional	
	18.620	2132.0	109.0	2023.0	5.39		
	19.000	2186.0	113.2	2072.8	5.46		
Factor de Corrección por Agregado + Caucho	-	2104.0	126.4	1977.6	6.39	Modificada con polvo de caucho	
	-	2092.0	125.3	1966.7	6.37		
Factor de Corrección por Agregado	-	1995.0	6.1	1988.9	0.31	Tradicional	

ANEXO I
DMM DE MUESTRAS ASFÁLTICAS

- **Densidad máxima de la mezcla: 8.302.37 del M.C.-V.8**

Contrato: Reposición Ruta G-184 Sector el Noviciado									
N° Pista	Km	Masa Seca Muestra	Masa Matraz +Agua	Masa Total Matraz	T°	ρ_w	DMM		Tipo de Mezcla asfáltica
		[g]	[g]	[g]	[C°]	[kg/m3]	[kg/m3]		
1	0.250	2051	7394	8617	25	997.1	2470	2462	Modificada con caucho
	0.250	2005	7394	8584	24	997.3	2453		
2	0.370	1919	7394	8541	25	997.1	2479	2	

Contrato: Mejoramiento Ruta F-50, Sector Lo Orozco-Quilpué									
Muestra	Km	Masa Seca Muestra	Masa Matraz +Agua	Masa Total Matraz	T°	ρ_w	DMM		Tipo de Mezcla asfáltica
		[g]	[g]	[g]	[C°]	[kg/m3]	[kg/m3]		
1	19.600	2287	7394	8761	25	997.1	2479	2473	Modificada con caucho
	19.640	2580	7394	8934	26	996.8	2473		
	19.670	2403	7394	8827	24	997.3	2471		
	18.900	2139	7394	8685	25	997.1	2515	2515	Tradicional
2	19.620	2375	7394	8807	24	997.3	2462	2472	Modificada con caucho
	19.720	2808	7394	9069	24	997.3	2472		
	19.780	2286	7394	8760	24	997.3	2478		
	18.620	1938	7394	8562	25	997.1	2510	2510	Tradicional

**ANEXO J
TESTIGOS**

ANEXO J.1
CONTRATO REPOSICIÓN RUTA G-184

Ensayos: 8.302.41 Determinación Espesor de Testigos Asfálticos
 8.302.38 Determinación Densidades de Testigos Asfálticos
 UNE 12697-26 Anexo C: Determinación del Módulo Resiliente

Pista N° 1											
Km	8.302.41: Espesor de mezclas asfálticas compactadas					8.302.38: Densidad real de mezclas asfálticas compactadas					Obs.
	X1	X2	X3	X4	Promedio	Peso Seco	Peso S.S.S.	Peso Agua	Densidad	Compactación	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[kg/m3]	[%]	
0.100	44.7	44.6	45.0	44.8	44.8	734.9	742.6	410.7	2214	96	Caucho
0.200	51.4	51.7	51.9	51.6	51.7	839.5	849.8	467.1	2194	95	
0.290	53.4	51.6	53.0	53.1	52.8	738.2	742.1	402	2171	94	
0.300	53.6	53.9	54.5	54.3	54.1	930.6	937.0	516.0	2210	96	
0.400	51.2	51.3	51.6	51.5	51.4	868.1	875.5	466	2120	92	
0.752	56.1	56.4	56.7	56.7	56.5	902.4	904.0	520.0	2350	99	Tradicional
1.252	54.6	55.4	55.5	54.9	55.1	843.5	844.7	486.2	2353	100	
1.752	52.2	52.2	52.0	51.9	52.1	757.7	764.9	425.6	2233	95	
2.252	50.1	51.9	50.8	50.3	50.8	771.4	773.0	445.9	2358	100	
2.551	50.8	52.1	51.8	51.7	51.6	784.1	788.5	444.1	2277	96	

Pista N° 2											
Km	8.302.41: Espesor de mezclas asfálticas compactadas					8.302.38: Densidad real de mezclas asfálticas compactadas					Obs.
	X1	X2	X3	X4	Promedio	Peso Seco	Peso S.S.S.	Peso Agua	Densidad	Compactación	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[kg/m3]	[%]	
0.150	55.9	54.8	56.0	56.0	55.7	875.3	890.1	497.1	2227	96	Caucho
0.250	54.4	54.6	54.8	54.4	54.6	932.4	937.0	527.6	2277	98	
0.290	55.8	55.8	55.9	55.8	55.8	835.2	839.5	462.9	2218	96	
0.350	54.2	54.4	53.8	54.6	54.3	888.3	898.8	504.1	2251	97	
0.450	58.9	59.1	57.5	58.4	58.5	1005.5	1017.6	567.4	2233	97	
0.752	55.1	53.8	54.4	53.2	54.1	827.2	829.6	471.5	2310	98	Tradicional
1.252	55.6	53.7	53.7	56.2	54.8	833.2	836.5	475.6	2309	98	
1.752	50.2	49.7	50.1	50.0	50.0	782.8	784.5	454.0	2369	100	
2.252	54.2	52.6	52.1	54.0	53.2	805.4	808.4	461.5	2322	98	
2.551	50.9	51.1	50.8	50.9	50.9	791.5	793.0	457.1	2356	100	

Pista N° 1										
Km Testigo	Diámetro Promedio	Altura Promedio	T°	Diámetro 1		Diámetro 2		MR Promedio	ΔMR	Obs.
				MR		MR				
	Medido	Ajustado	Medido	Ajustado	Ajustado	Ajustado				
	[mm]	[mm]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	
0.100	100.2	43.4	15	5549	5298	5130	5150	5224	103	Caucho
0.200	100.8	50.8		4734	4738	5071	5088	4913	93	
0.300	100.8	54.6		6011	6026	5781	5775	5901	104	
0.100	100.2	43.4	25	2764	2753	2519	2515	2634	109	
0.200	100.8	50.8		2217	2216	2173	2179	2198	102	
0.300	100.8	54.6		2816	2810	2751	2749	2780	102	

Pista N° 2										
Km Testigo	Diámetro Promedio	Altura Promedio	T°	Diámetro 1		Diámetro 2		MR Promedio	ΔMR	Obs.
				MR		MR				
	Medido	Ajustado	Medido	Ajustado	Ajustado	Ajustado				
	[mm]	[mm]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	
0.150	101.5	53.0	15	4718	4712	4733	4728	4720	100	Caucho
0.250	101.4	53.1		8004	8003	7817	7842	7923	102	
0.350	101.2	51.9		5715	5709	5744	5736	5723	100	
0.450	101.0	58.7		6112	6118	5898	5891	6005	104	
0.150	101.5	53.0	25	2257	2240	2207	2194	2217	102	
0.250	101.4	53.1		4027	4065	4028	4077	4071	100	
0.350	101.2	51.9		2608	2608	2559	2555	2582	102	
0.450	101.0	58.7		2597	2590	2448	2444	2517	106	

ANEXO J.2
CONTRATO MEJORAMIENTO RUTA F-50

Ensayos: 8.302.41 Determinación Espesor de Testigos Asfálticos
 8.302.38 Densidades de Testigos Asfálticos
 UNE 12697-26 Anexo C: Determinación de Módulo Resiliente

Pista N° 1											
Km	8.302.41: Espesor de mezclas asfálticas compactadas					8.302.38: Densidad real de mezclas asfálticas compactadas					Obs.
	X1	X2	X3	X4	Promedio	Peso Seco	Peso S.S.S.	Peso Agua	Densidad	Compactación	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[kg/m3]	[%]	
19.460	63.1	56.9	59.5	63.49	60.7	988.6	991.5	570.6	2349	101	Caucho
19.560	54.0	54.8	50.1	53.9	53.2	922.1	929.0	531.7	2321	100	
19.660	50.7	51.6	54.0	50.2	51.6	913.1	916.6	525.0	2332	100	
19.760	52.1	49.6	53.8	54.4	52.5	920.9	925.0	531.7	2341	101	
20.950	55.3	56.2	55.7	53.9	55.3	959.6	963.2	548.7	2315	98	Tradicional
20.950	55.2	55.4	54.8	57.0	55.6	1063.2	1067.3	610.0	2325	98	

Pista N° 2											
Km	8.302.41: Espesor de mezclas asfálticas compactadas					8.302.38: Densidad real de mezclas asfálticas compactadas					Obs.
	X1	X2	X3	X4	Promedio	Peso Seco	Peso S.S.S.	Peso Agua	Densidad	Compactación	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[kg/m3]	[%]	
19.760	54.0	53.9	54.5	52.6	53.7	953.4	957.7	545.7	2314	100	Caucho
19.660	56.6	52.8	57.6	56.7	55.9	918.5	922.9	528.5	2329	100	
19.560	51.7	49.0	50.7	51.9	50.8	821.2	823.8	471.5	2331	100	
19.460	52.7	43.8	58.1	54.9	52.4	988.3	990.0	572.8	2369	102	
20.950	51.7	53.6	54.5	55.6	53.8	934.3	936.7	534.9	2325	98	Tradicional
20.950	52.2	54.0	51.6	46.4	51.0	893.1	898.2	506.9	2282	97	

Pista N° 1										
Km Testigo	Diámetro Promedio	Altura Promedio	T°	Diámetro 1		Diámetro 2		MR Promedio	ΔMR	Obs.
				MR		MR				
			Medido	Ajustado	Medido	Ajustado	Ajustado	Ajustado		
			[mm]	[mm]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
19.460	100.2	54.9	15	8075	8138	7709	7742	7940	105	Caucho
19.560	100.3	52.4		6911	6933	7074	7097	7015	98	
19.660	100.1	50.7		7770	7835	7494	7530	7683	104	
19.760	100.3	51.1		8518	8559	8676	8691	8625	98	
20.950	100.3	53.8		4504	4541	4129	4148	4345	109	Tradicional
20.950	100.2	60.2		-	-	-	-	-	-	
19.460	100.2	54.9	25	3637	3659	3748	3753	3706	97	Caucho
19.560	100.3	52.4		3428	3431	3337	3339	3385	103	
19.660	100.1	50.7		3881	3867	3883	3874	3871	100	
19.760	100.3	51.1		4356	4350	4526	4512	4431	96	
20.950	100.3	53.8		1513	1515	1455	1450	1483	104	Tradicional
20.950	100.2	60.2		-	-	-	-	-	-	

Pista N° 2										
Km Testigo	Diámetro Promedio	Altura Promedio	T°	Diámetro 1		Diámetro 2		MR Promedio	ΔMR	Obs.
				MR		MR				
			Medido	Ajustado	Medido	Ajustado	Ajustado	Ajustado		
			[mm]	[mm]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
19.760	100.4	53.3	15	6983	6998	6694	6698	6848	104	Caucho
19.660	100.4	51.5		6904	6912	7006	7013	6963	99	
19.560	100.3	46.2		8638	8651		8698	8675	99	
19.460	100.4	53.9		8341	8351	8784	8804	8578	95	
20.950	100.3	52.3		4901	4935	4441	4463	4699	111	Tradicional
20.950	100.3	50.6		3588	3604	3396	3412	3508	106	
19.760	100.4	53.3	25	3419	3418	3471	3470	3444	99	Caucho
19.660	100.4	51.5		3522	3516	3468	3465	3491	101	
19.560	100.3	46.2		4067	4071	4287	4281	4176	95	
19.460	100.4	53.9		3965	3952	3757	3753	3853	105	
20.950	100.3	52.3		1739	1739	1603	1607	1673	108	Tradicional
20.950	100.3	50.6		1254	1253	1224	1223	1238	102	

**ANEXO K
CÍRCULO DE ARENA.**

- **Contrato: Reposición Ruta G-184, Sector El Noviciado, Tramo Km 0.077 a Km 5.400, Comuna de Pudahuel, Provincia de Santiago, Región Metropolitana.**

Pista N° 1									
Km	Huella	Lectura Diámetro [cm]						MTD [mm]	Observación
		1	2	3	4	5	Promedio		
0.100	Externa	24.5	27.2	24.0	23.2	27.3	25.2	0.5	Caucho
0.200	Externa	27.5	28.1	27.2	28.3	28.7	28.0	0.4	Caucho
0.300	Externa	26.2	28.0	27.0	24.5	27.0	26.5	0.5	Caucho
0.400	Externa	26.0	24.0	26.0	26.3	25.0	25.5	0.5	Caucho

Pista N° 2									
Km	Huella	Lectura Diámetro [cm]						MTD [mm]	Observación
		1	2	3	4	5	Promedio		
0.450	Externa	25.7	22.8	22.5	23.5	22.6	23.4	0.6	Caucho
0.350	Externa	24.0	24.5	23.6	23.7	23.8	23.9	0.6	Caucho
0.250	Externa	25.0	23.2	24.7	24.0	23.0	24.0	0.6	Caucho
0.150	Externa	21.2	20.0	21.5	20.5	20.3	20.7	0.7	Caucho

- **Contrato: Mejoramiento Ruta F-50, Sector Lo Orozco-Quilpué, Tramo Km 17.578- Km 29.498, Provincia de Marga Marga, Región de Valparaíso.**

Pista N° 1									
Km	Huella	Lectura Diámetro [cm]						MTD [mm]	Observación
		1	2	3	4	5	Promedio		
19.460	Externa	23.7	23.4	23.9	23.8	23.8	23.7	0.6	Caucho
19.560	Externa	25.5	27.0	25.3	26.5	27.3	26.3	0.5	Caucho
19.660	Externa	28.0	31.4	31.2	27.0	30.0	29.5	0.4	Caucho
19.760	Externa	32.5	33.5	30.0	32.5	32.0	32.0	0.3	Caucho
20.950	Externa	23.0	22.5	21.3	21.5	23.5	22.6	0.6	Tradicional

Pista N° 2									
Km	Huella	Lectura Diámetro [cm]						MTD [mm]	Observación
		1	2	3	4	5	Promedio		
20.950	Externa	31.7	30.3	30.1	27	29.4	29.7	0.4	Tradicional
19.760	Externa	30.3	32.8	29.0	29.5	30.5	30.4	0.3	Caucho
19.660	Externa	33.5	29.2	31.2	31.5	32.5	31.6	0.3	Caucho
19.560	Externa	28.0	25.0	27.3	26.5	27.3	26.8	0.4	Caucho
19.460	Externa	31.5	27.0	29.8	27.5	30.5	29.3	0.4	Caucho

ANEXO L
COEFICIENTE DE FRICCIÓN CON PÉNDULO TRRL

- **Contrato: Mejoramiento Ruta F-50, Sector Lo Orozco-Quilpué, Tramo Km 17.578- Km 29.498, Provincia de Marga Marga, Región de Valparaíso.**

Pista N° 1										
Km	Huella	Temperatura agua [°C]	Lectura (BPN)						Valor Corregido (CRD)	Observación
			1	2	3	4	5	Promedio		
19.460	Externa	24	69	70	70	70	70	69.8	0.71	Caucho
19.560	Externa	24	65	65	64	65	65	64.8	0.66	Caucho
19.660	Externa	24	52	53	53	55	55	53.6	0.55	Caucho
19.760	Externa	26	64	66	66	64	66	65.2	0.67	Caucho
20.950	Externa	28	54	55	54	53	54	54.0	0.56	Tradicional

Pista N° 2										
Km	Huella	Temperatura agua [°C]	Lectura (BPN)						Valor Corregido (CRD)	Observación
			1	2	3	4	5	Promedio		
20.950	Externa	18	67	67	67	68	68	67.4	0.67	Tradicional
19.760	Externa	29	56	57	58	59	58	57.6	0.60	Caucho
19.660	Externa	29	52	52	53	53	54	52.8	0.55	Caucho
19.560	Externa	32	59	60	60	60	60	59.8	0.64	Caucho
19.460	Externa	32	54	54	55	56	56	55.0	0.59	Caucho

ANEXO M
DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO

- **Contrato: Reposición Ruta G-184, Sector el Noviciado, Tramo Km 0.077 a Km 5.400, Región Metropolitana.**

Pista 1	Km	Carga	DMX	MR	Ep	NEef	Pista 2	Km	Carga	DMX	MR	Ep	NEef
		[kN]	[μ m]	[MPa]	[MPa]	[cm]			[kN]	[μ m]	[MPa]	[MPa]	[cm]
Km 0.080 al Km 0.500 (Mezcla asfáltica con polvo de caucho)	0.080	51.1	643	70	475	7.7	Km 0.500 al Km 0.080 (Mezcla asfáltica con polvo de caucho)	0.490	50.4	560	72	599	8.4
	0.100	51.2	620	70	511	7.9		0.470	50.6	576	74	559	8.2
	0.120	51.3	599	71	536	8.1		0.450	50.5	556	74	594	8.3
	0.140	51.2	521	94	553	8.1		0.430	50.6	524	74	665	8.7
	0.160	51.7	492	89	633	8.5		0.410	50.6	538	71	658	8.6
	0.180	51.7	547	81	569	8.2		0.390	50.6	538	75	624	8.5
	0.200	51.5	615	67	536	8.1		0.370	50.4	583	71	561	8.2
	0.220	51.6	550	75	600	8.4		0.350	50.4	650	71	460	7.7
	0.240	51.4	566	86	509	7.9		0.330	50.4	523	74	668	8.7
	0.260	51.6	501	84	646	8.6		0.310	50.7	491	84	670	8.7
	0.280	51.8	523	85	592	8.3		0.290	50.6	488	81	697	8.8
	0.300	51.3	525	80	616	8.4		0.270	50.5	488	84	675	8.7
	0.320	51.2	510	81	645	8.6		0.250	50.6	470	89	692	8.8
	0.340	51.3	503	76	699	8.8		0.230	50.4	486	88	656	8.6
	0.360	51.0	551	75	598	8.4		0.210	50.4	551	76	591	8.3
	0.380	51.1	529	72	663	8.7		0.190	50.1	577	61	656	8.6
	0.400	51.2	536	76	617	8.5		0.170	50.2	460	93	693	8.8
	0.420	51.4	521	76	652	8.6		0.150	50.3	555	74	592	8.3
0.440	51.0	585	70	566	8.2	0.130	50.1	500	88	621	8.5		
0.460	51.0	521	77	649	8.6	0.110	50.0	666	63	490	7.8		
0.480	51.2	619	67	527	8.0	0.090	50.1	652	64	502	7.9		
0.500	51.1	519	75	670	8.7	0.700	51.2	463	84	745	9.0		
Km 0.500 al Km 0.700 (Mezcla asfáltica tradicional)	0.520	51.2	617	70	512	7.9	Km 0.700 al Km 0.500 (Mezcla asfáltica tradicional)	0.690	51.0	571	76	552	8.1
	0.540	51.0	569	73	577	8.3		0.670	51.0	501	75	715	8.9
	0.560	51.3	535	75	628	8.5		0.650	50.8	517	74	682	8.7
	0.580	51.1	578	75	544	8.1		0.630	50.8	530	71	670	8.7
	0.600	50.7	636	73	468	7.7		0.610	50.6	586	70	565	8.2
	0.620	50.7	627	82	443	7.6		0.590	50.9	551	65	674	8.7
	0.640	51.0	615	77	479	7.8		0.570	50.7	580	67	600	8.4
	0.660	50.8	640	76	450	7.6		0.550	50.9	553	68	642	8.6
	0.680	50.8	640	79	437	7.5		0.530	50.8	573	68	606	8.4
	0.700	51.1	476	79	748	9.0		0.510	50.5	558	68	634	8.5

- **Contrato: Mejoramiento Ruta F-50, Sector Lo Orozco-Quilpué, Tramo Km 17.578- Km 29.498, Provincia de Marga Marga, Región de Valparaíso.**

Pista 1	Km	Carga	DMX	MR	Ep	NEef	Pista 2	Km	Carga	DMX	MR	Ep	NEef
		[kN]	[μ m]	[MPa]	[MPa]	[cm]			[kN]	[μ m]	[MPa]	[MPa]	[cm]
Km 19.300 al Km 19.800 (Mezcla asfáltica con polvo de caucho)	19.300	50.6	509	89	585	8.5	Km 19.800 al Km 19.300 (Mezcla asfáltica con polvo de caucho)	19.775	49.6	404	105	776	9.3
	19.350	50.9	345	139	830	9.6		19.760	49.8	412	103	765	9.3
	19.400	50.9	399	110	764	9.3		19.725	50	410	104	763	9.3
	19.450	51	380	135	715	9.1		19.675	49.9	483	90	639	8.8
	19.460	50.7	443	101	683	9.0		19.660	50	467	91	671	8.9
	19.500	50.7	461	100	642	8.8		19.625	49.9	465	80	754	9.3
	19.550	50.3	637	80	429	7.7		19.575	49.8	558	82	530	8.2
	19.560	50.5	520	87	575	8.5		19.560	50	456	97	665	8.9
	19.600	50.5	513	87	589	8.5		19.525	50.3	250	183	1183	10.8
	19.650	50.5	553	88	510	8.1		19.475	50	426	109	687	9.0
	19.660	50.6	502	92	585	8.5		19.460	49.9	411	110	728	9.1
	19.700	50.7	460	92	687	9.0		19.425	50.2	340	160	770	9.3
	19.750	50.6	428	102	721	9.1		19.375	49.8	466	91	676	8.9
	19.760	50.4	438	90	763	9.3		19.325	49.7	493	89	621	8.7
19.760	50.5	416	93	820	9.5	19.275	49.6	600	80	478	7.9		
Mezcla asfáltica tradicional	19.000	50	482	114	540	8.3	Mezcla asfáltica tradicional	19.225	49.9	426	121	639	8.8
	19.050	50.5	602	84	457	7.8		19.175	50	396	132	677	8.9
	19.100	50.8	506	98	551	8.3		19.125	49.8	474	114	554	8.3
	19.150	50.9	459	110	598	8.6		19.075	49.9	459	124	553	8.3
	19.200	50.6	525	100	512	8.1		19.025	50.2	418	140	597	8.6
	19.250	50.7	548	90	511	8.1		19.000	50.1	439	139	554	8.3
Mezcla Asfáltica tradicional	20.850	49.9	673	63	469	7.9	Mezcla Asfáltica tradicional	20.975	50.4	404	147	620	8.5
	20.900	50.2	540	82	561	8.4		20.925	49.9	661	64	489	7.8
	20.950	49.9	712	64	415	7.6		20.875	50.3	545	85	549	8.1
	21.000	50.3	412	120	680	8.9		20.825	50.2	300	215	793	9.2