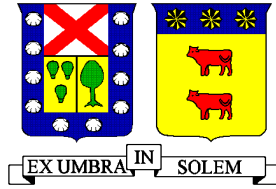


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLA ASFÁLTICA CON
INCORPORACIÓN DE POLVO DE CAUCHO NACIONAL, MEDIANTE VÍA SECA, VERSUS
MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS Y ASFALTO MULTIGRADO.
TRAMO DE PRUEBA: CATAPILCO – LA LAGUNA

Memoria de titulación presentado por
DIEGO AGUSTÍN SALAMANCA VERA

Como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Profesora Guía
GABRIELA MUÑOZ ROJAS
Profesor Correferente
CARLOS WAHR DANIEL

Mayo de 2018

Agradecimientos

En primer término, agradecer al Laboratorio Nacional de Vialidad por la posibilidad de realizar en sus instalaciones esta investigación, disponiendo sus equipos y su personal para cooperar en este trabajo. Particularmente, de forma muy especial, quiero agradecer a mi profesora guía, Sra. Gabriela Muñoz Rojas, quien con su experiencia y dedicación me permitió llegar a buen término con esta memoria, además de aportar humanamente en mi caminar por el laboratorio, entregando paciencia y profesionalismo para desarrollar de mejor manera el trabajo encomendado. También agradecer a la gente que trabaja en el subdepartamento de Asfalto del LNV, en especial a Rodrigo Uribe por su apoyo técnico, especialmente en el desarrollo del ensayo de viga de cuatro puntos, y a don Aníbal Meza, pues es el profesor guía “de laboratorio” que tienen la mayoría de los memoristas del área de asfalto.

De igual forma, quiero agradecer a mi profesor correferente, don Carlos Wahr Daniel, quien fue una inspiración crucial en mi entrada al mundo del asfalto, su motivación para hacer clases y la claridad de sus conceptos despertó mi interés en el tema. Además, aprecio su disposición a apoyar esta memoria tanto con recursos técnicos como con conocimiento, para realizarla de la mejor manera. Finalmente, como profesional es un ejemplo de responsabilidad y rigurosidad para las generaciones de ingenieros civiles de la USM.

Asimismo, debo agradecer a María de los Ángeles Bascuñan por su contención emocional y su apoyo psicológico para la elaboración de esta memoria.

Aprovecho la oportunidad de agradecer a mi madre, quien es el pilar fundamental en la realización de esta memoria, con su apoyo, fortaleza y cariño logra ser mi modelo a seguir en la vida.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a toda la gente que de una u otra forma ayudó para terminar la universidad; muchas gracias por apoyarme en los momentos que lo necesité.

Resumen

El presente trabajo contempla la confección y seguimiento de tres tramos de prueba contiguos de 500 [m] de largo cada uno, realizados con mezclas asfálticas modificadas, fabricadas con asfalto modificado con polímeros, asfalto multigrado y asfalto modificado con polvo de caucho de neumáticos fuera de uso incorporado por vía seca. El objetivo de estos tramos es comparar el comportamiento de las mezclas a través de diversos ensayos, para establecer los beneficios y desventajas de cada tramo.

Los ensayos se realizan para mezcla confeccionada en laboratorio y mezcla confeccionada en planta, extraída en terreno. Los ensayos que se utilizan para comparar las mezclas son: Estabilidad – Fluidez (norma 8.302.40 del M.C.-V.8), Módulo de Rigidez (UNE-EN 12697 – 26), Ahuellamiento con Rueda de Hamburgo (AASHTO T-324), Fatiga con Viga de Cuatro Puntos (AASHTO T-321). Conjuntamente se suman ensayos de auscultación realizados en terreno al pavimento ya terminado. A nivel personal, se diseña el tramo de prueba de asfalto con caucho, se realiza la visación del asfalto modificado con polímeros y el asfalto multigrado, y luego se realizan los ensayos comparativos anteriormente descritos, a excepción de la auscultación que la ejecuta el departamento especializado del Laboratorio Nacional de Vialidad.

Se comprueba que la mezcla de asfalto con caucho es más rígida que las otras mezclas modificadas. La mezcla modificada con polímeros tiene un comportamiento óptimo a fatiga y a ahuellamiento. El asfalto multigrado desarrolla un buen comportamiento al ahuellamiento, pero desarrolla un comportamiento aleatorio a la fatiga, siendo esta última la principal falla observada en los pavimentos.

Finalmente, se determina que el asfalto con caucho presenta un comportamiento mecánico satisfactorio bajo condiciones susceptibles al ahuellamiento, como pueden ser estacionamientos y plazas de peaje, siempre y cuando se asegure el tiempo de digestión adecuado, lo cual es muy difícil de controlar en terreno; mientras que el asfalto modificado con polímeros presenta un comportamiento óptimo bajo todas las condiciones de tránsito. Asimismo, debe considerarse que la tecnología utilizada en la producción de asfalto con caucho por vía seca es accesible y en general las constructoras ya poseen la capacidad instalada para realizar dicha mezcla, por tanto, no sólo mejora el comportamiento del asfalto, sino que se presenta como una buena solución en el mercado actual, siendo amigable con el medio ambiente.

Palabras clave: mezcla asfáltica modificada con polímeros, asfalto multigrado, caucho, NFU, ahuellamiento, fatiga.

Abstract

The present work contemplates the preparation and follow-up of three contiguous test sections of 500 [m] length each, made with modified asphalt mixtures, manufactured with polymer-modified asphalt, asphalt multigrade asphalt and recycled tire rubber asphalt incorporated by dry process. The objective of these sections is compare the behavior of the mixtures through many tests, to establish the benefits and disadvantages of each section.

The tests are carried out for hot mix made in laboratory and hot mix made in plant, extracted in field. The laboratory tests used to compare the mixtures are: Stability - Fluency (standard 8.302.40 of MC-V.8), Stiffness Module (UNE-EN 12697 - 26), Hamburg Wheel Tracking (AASHTO T-324), Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt Subjected to Repeated Flexural Bending (AASHTO T-321). In addition, are added auscultation tests of performance to the finished pavement. Personally, the asphalt rubber test section was designed, the polymer modified asphalt and multigrade asphalt was verified, and then the comparative tests described above are performed, except for the auscultation performed by the specialized department of the Highway National Laboratory.

It is verified that rubber asphalt is more rigid than the other modified mixtures, however, it has a correct behavior to fatigue and rutting. The polymer-modified hot mix asphalt has an optimal fatigue and rutting behavior. The multigrade asphalt develops a good behavior to rutting, but a random behavior to fatigue, the main failure observed in chilean pavements.

In addition, the benefit to the environment that generates the reuse of national out of use tires should be considered, allowing an economically viable alternative to improve the quality of the asphalt, with the contribution to the reduction of tire waste (NFU), in accordance with the new Law of Recycling Promotion, which places rubber as a priority material to be reused.

Finally, it is determined that the rubber asphalt presents a satisfactory mechanical behavior under conditions of rutting, such as parking lots and toll areas; while polymer-modified asphalt exhibits optimal performance under all traffic conditions. Likewise, it should be considered that the technology used in the production of rubber asphalt by dry process is accessible and in general the constructors already have the installed capacity to make this mixture, therefore, not only improves the behavior of the asphalt, also presents as a good solution in the current market, being friendly to the environment.

Keywords: polymer-modified asphalt, multigrade asphalt, rubber, NFU, rutting, fatigue.

Índice

Agradecimientos	2
Dedicatoria	3
Resumen.....	4
Abstract	6
Índice de figuras	11
Índice de tablas	13
1. Introducción	15
1.1 Objetivos generales.....	18
1.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 Alcances y limitaciones	19
2. Marco teórico.....	20
2.1 El pavimento asfáltico	20
2.1.1 Diseño de pavimentos asfálticos	21
2.1.2 Deterioros.....	22
2.2 Mezcla asfáltica en caliente	24
2.2.1 Cemento asfáltico.....	25
2.2.2 Agregados pétreos	27
2.2.3 Asfaltos modificados	30
2.3 Asfalto con caucho	33
2.3.1 El caucho	34
2.3.2 El neumático fuera de uso.....	35
2.3.3 Incorporación del caucho en la mezcla bituminosa	38
2.4 Método de diseño de carpeta de rodadura	42
3. Ensayos para verificación del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente	43
3.1 Agregados pétreos	43
3.1.1 Fracción gruesa	43
3.1.2 Fracción fina	44
3.1.3 Mezcla de áridos	45
3.2 Cemento asfáltico	46
3.3 Polvo de caucho	48
3.4 Mezcla asfáltica	49

3.4.1	Ensayos tradicionales	49
3.4.2	Ensayo sensibilidad al agua	49
3.4.3	Módulo de rigidez de la mezcla.....	51
3.4.4	Ahuellamiento	53
3.4.5	Fatiga	56
3.5	Controles de terreno	60
3.5.1	Medición de deflexiones	61
3.5.2	Índice de regularidad superficial (IRI)	62
3.5.3	Resistencia al deslizamiento.....	64
4.	Seguimiento tramos de prueba.....	66
4.1	Ubicación.....	66
4.2	Características	67
4.3	Caracterización de los materiales	67
4.3.1	Plantas de asfalto	68
4.3.2	Agregados.....	69
4.3.3	Cemento asfáltico.....	75
4.3.4	Caucho.....	76
4.4	Diseño mezcla asfáltica	77
4.4.1	Visación mezcla de asfalto multigrado.....	78
4.4.2	Visación mezcla de asfalto con modificado con polímeros.....	78
4.4.3	Diseño mezcla asfalto con caucho por vía seca	79
4.5	Ensayos de comportamiento mecánico	82
4.5.1	Rigidez a través del método de módulo resiliente.....	82
4.5.2	Ahuellamiento bajo agua	84
4.5.3	Fatiga	88
4.6	Controles funcionales y estructurales al pavimento terminado.....	95
4.6.1	Control del espesor de la carpeta	95
4.6.2	Control de rugosidad	95
4.6.3	Control de resistencia al deslizamiento con péndulo británico	102
4.6.4	Control de fricción transversal	102
4.6.5	Control de macrotextura.....	105
4.6.6	Análisis de resultados.....	106
	Conclusiones	107

Conclusiones generales	107
Conclusiones específicas	108
Recomendaciones	109
Referencias	110
Anexo A: Resultados ensaye de fatiga, viga de cuatro puntos	112
Anexo B: Resultados de ensayos para asfalto modificado con caucho, usando un método propuesto para utilizar planta continua	114
Anexo C: Dosificación Marshall de asfalto multigrado	116
Anexo D: Dosificación Marshall de asfalto modificado con polímeros.....	118
Anexo E: Resultados ensayo módulo de rigidez.....	120
Anexo F: Resultados péndulo británico	123
Anexo G: Medición de macrotextura	128
Anexo H: Perfiles de ensaye de ahuellamiento.....	131
Anexo I: Características físicas de probetas usadas en ensaye de módulo.	135
Anexo J: Características físicas de las probetas usadas en ensaye de ahuellamiento	140

Índice de figuras

Figura 1-1: Distribución de la red vial chilena según carpeta de rodadura (2016) [1].....	15
Figura 1-2: Incendio vertedero de Seseña, España [3].....	17
Figura 2-1: Sistema multicapas ruta E - 46, Catapilco - La Laguna [4].....	20
Figura 2-2: Distribución de carga de la rueda bajo el pavimento [4].....	21
Figura 2-3: Pavimento con deterioro por fatiga.....	22
Figura 2-4: Pavimento con deterioro por ahuellamiento [5]	23
Figura 2-5: Pavimento con deterioro por desprendimiento de los agregados	23
Figura 2-6: Carpeta asfáltica tras proceso de compactación	24
Figura 2-7: Destilación fraccionada del petróleo [6]	26
Figura 2-8: Composición química del asfalto [4]	27
Figura 2-9: Textura superficial del pavimento asfáltico [4].....	30
Figura 2-10: Gráfica cualitativa de rigidez versus temperatura para asfalto tradicional y modificado [4]	31
Figura 2-11: Fórmula molecular del caucho natural	34
Figura 2-12: Sección del neumático fuera de uso	36
Figura 2-13: Proceso de fabricación de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho por vía seca [7]	39
Figura 2-14: Proceso de fabricación de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho por vía húmeda [7]	40
Figura 3-1: Esfuerzo aplicado y deformación aplicada en ensaye de módulo dinámico de la mezcla asfáltica	52
Figura 3-2: Ilustración del módulo complejo	52
Figura 3-3: Disposición de carga en ensaye de módulo de rigidez	53
Figura 3-4: Rueda de Hamburgo	54
Figura 3-5: Probeta de ahuellamiento post ensayo	55
Figura 3-6: Gráfico cualitativo de ensaye de ahuellamiento por rueda de Hamburgo.....	56
Figura 3-7: Equipo viga de cuatro puntos, para análisis de fatiga	57
Figura 3-8: Longitudes de probeta prismática para ensaye de fatiga.....	58
Figura 3-9: Vista lateral con puntos característicos de ensaye de fatiga.....	58

Figura 3-10: Localización típica de los sensores del Deflectómetro de impacto con respecto al plato de carga	61
Figura 3-11: Deflectómetro de impacto KUAB, perteneciente al LNV	62
Figura 3-12: Bosquejo de camino con IRI deficiente y camino con IRI óptimo.....	63
Figura 3-13: Bosquejo en planta del equipo SCRIM.....	65
Figura 4-1: Ubicación geográfica del proyecto.....	67
Figura 4-2: Diagrama de proceso de una planta continua	68
Figura 4-3: Diagrama de procesos de una planta discontinua	69
Figura 4-4: Granulometría Áridos Catapilco.....	71
Figura 4-5: Granulometría Áridos Con Con	72
Figura 4-6: Resultados de Ahuellamiento para ensayos realizados en LNV y en UTFSM	86
Figura 4-7: Ahuellamiento de las mezclas confeccionadas en laboratorio.....	87
Figura 4-8: Ahuellamiento de las mezclas, extracción en terreno	87
Figura 4-9: Curva de fatiga para los tres asfaltos estudiados	93
Figura 4-10: Curvas de fatiga para ensayos realizados en LNV y en LEMCO, UTFSM [14] [15].	94
Figura 4-11: IRI de tramo asfalto con caucho en pista 1	96
Figura 4-12: IRI de tramo asfalto con caucho en pista 2.....	97
Figura 4-13: IRI de tramo asfalto multigrado en pista 1	98
Figura 4-14: IRI de tramo asfalto multigrado en pista 2	99
Figura 4-15: IRI en tramo asfalto con polímeros en pista 1	100
Figura 4-16: IRI en tramo asfalto con polímeros en pista 2	101

Índice de tablas

Tabla 2-1: Granulometría del polvo de caucho, NCh 3258-2012.....	37
Tabla 3-1: Exigencias fracción gruesa del árido según Manual de Carreteras.....	44
Tabla 3-2: Exigencias fracción fina del árido, según Manual de Carreteras	45
Tabla 3-3: Granulometría de tipo semi-densa	45
Tabla 3-4: Exigencias para cemento asfáltico tradicional, según Manual de Carreteras	46
Tabla 3-5: Exigencias para cemento asfáltico modificado con polímeros	47
Tabla 3-6: Exigencias para cemento asfáltico multigrado.....	48
Tabla 3-7: Exigencias de vacíos en el agregado mineral, según Manual de Carreteras.....	49
Tabla 3-8: Semejanzas ensaye de laboratorio con falla de fatiga en terreno.....	59
Tabla 3-9: Diferencias entre ensaye de laboratorio y falla de fatiga en terreno	60
Tabla 3-10: Exigencia IRI Manual de Carreteras.....	65
Tabla 4-1: Granulometría Áridos Catapilco	71
Tabla 4-2: Granulometría áridos Con Con.....	72
Tabla 4-3: Características fracción gruesa áridos Catapilco	73
Tabla 4-4: Características fracción gruesa áridos Con Con	73
Tabla 4-5: Características fracción fina áridos Catapilco.....	74
Tabla 4-6: Características fracción fina áridos Con Con	74
Tabla 4-7: Características cemento asfáltico modificado con polímeros	75
Tabla 4-8: Características cemento asfáltico multigrado.....	75
Tabla 4-9: Características cemento asfáltico tradicional usado en asfalto con caucho.....	76
Tabla 4-10: Características del polvo de caucho	77
Tabla 4-11: Granulometría polvo de caucho.....	77
Tabla 4-12: Visación de parámetros Marshall mezcla de asfalto multigrado.....	78
Tabla 4-13: Visación de parámetros Marshall mezcla modificada con polímeros.....	79
Tabla 4-14: Estudio del tiempo de digestión para el asfalto con caucho	81
Tabla 4-15: Dosificación de asfalto con caucho	81
Tabla 4-16: Resultados módulo resiliente para tramos de prueba.....	83
Tabla 4-17: Resultados Ahuellamiento para tramos de prueba	85
Tabla 4-18: Resultados Ahuellamiento UTFSM.....	85

Tabla 4-19: Rutina usada en compactador de rodillo	90
Tabla 4-20: Resultados ensaye de fatiga, asfalto con polímeros	91
Tabla 4-21: Resultados ensaye de fatiga, asfalto multigrado	92
Tabla 4-22: Resultados ensaye de fatiga asfalto con caucho.....	92
Tabla 4-23: Control de espesor de carpeta en tramo de prueba.....	95
Tabla 4-24: Datos de IRI en tramo de prueba de asfalto con caucho, pista 1	96
Tabla 4-25: Datos de IRI en tramo de prueba de asfalto con caucho, pista 2	97
Tabla 4-26: Datos de IRI en tramo de prueba de asfalto multigrado, pista 1	98
Tabla 4-27: Datos de IRI en tramo de prueba de asfalto multigrado, pista 2	99
Tabla 4-28: Datos de IRI en tramo de prueba de asfalto modificado con polímeros, pista 1.....	100
Tabla 4-29: Datos de IRI en tramo de prueba de asfalto modificado con polímeros, pista 2.....	101
Tabla 4-30: Resultados de deslizamiento con TRRL en tramo de prueba.....	102
Tabla 4-31: Resultados de fricción con SCRIM en tramo de asfalto con caucho (07/03/2017).....	103
Tabla 4-32: Resultados de fricción con SCRIM en tramo de asfalto multigrado (07/03/2017)	104
Tabla 4-33: Resultados de fricción con SCRIM en tramo de asfalto modificado con polímeros (07/03/2017)	105
Tabla 4-34: Resultados de macrotextura a través del ensaye de Círculo de Arena.....	106

1. Introducción

El uso del asfalto para construcción de caminos se inició a fines del siglo XIX, creciendo velozmente hasta nuestros días, convirtiéndose en el principal pavimento utilizado en las carreteras de Chile, tanto como carpeta asfáltica, como en tratamientos superficiales (véase Figura 1-1). Por ende, la aplicación de ciencia y tecnología en el asfalto se hace primordial, para poder afrontar los desafíos del presente y futuro. En ese sentido, los asfaltos tradicionales han cumplido una misión importante, pero que hoy en día se está viendo superada por el actual parque automotor, el cual hace insostenible proyectar las carreteras sin aplicar mejoras en el desempeño de las rutas.

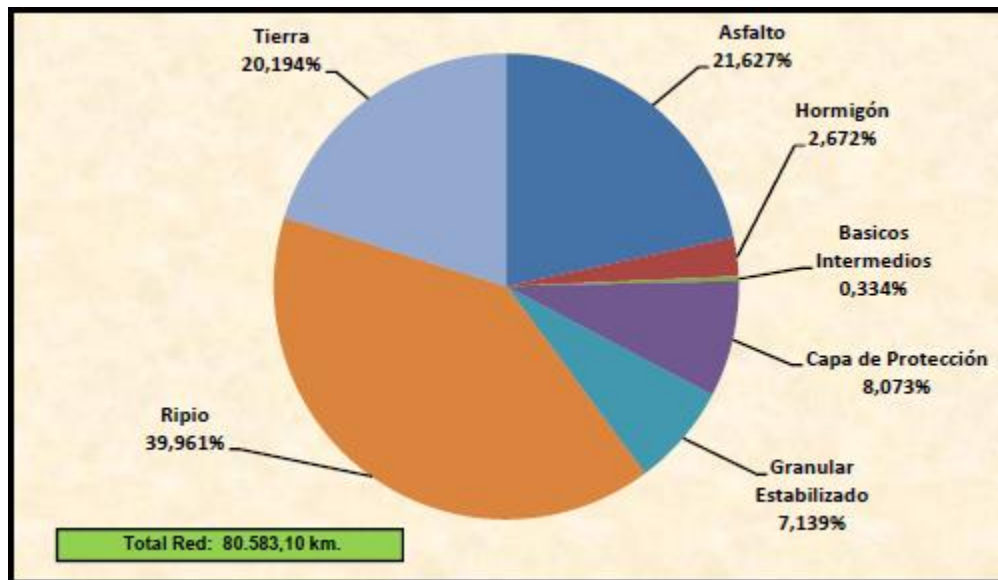


Figura 1-1: Distribución de la red vial chilena según carpeta de rodadura (2016) [1]

Por esta necesidad de mejora, es que distintas soluciones han emergido a través del tiempo, siendo una de las más populares la modificación del asfalto, a través del uso de aditivos o perfeccionando sus propiedades reológicas, buscando un mayor rendimiento tanto al tráfico como a los cambios de temperatura.

Dentro de los asfaltos modificados, en Chile existen dos tipos: el asfalto multigrado y el asfalto modificado con polímeros, encontrándose en estudio el asfalto modificado con polvo de caucho. Comúnmente en nuestro país se cree que estos tres tipos de ligantes ofrecen desempeños similares en resistencia a deformaciones permanentes, mantener el comportamiento elástico a bajas

temperaturas y resistencia a la fatiga. Sin embargo, esto no es necesariamente cierto. Es por esta razón que es necesario comparar estos tres asfaltos, en condiciones ambientales y de tráfico real, para establecer las diferencias entre cada una de las mezclas.

Además, se debe considerar el problema actual de la disposición de desechos, tema de preocupación mundial que se ha tomado la agenda en los últimos años, debido al cambio climático, que tiene como uno de sus factores detonantes la mala administración de nuestros residuos. Por ello resulta primordial reutilizar los neumáticos que se encuentran fuera de uso.

El neumático tiene un proceso de descomposición orgánica de más de 500 años, por lo tanto, provoca problemas asociados a su almacenaje, ya que al ser incinerados liberan una gran cantidad de toxinas al medio ambiente, favoreciendo el calentamiento global, de ahí la prohibición en nuestro país de quemarlos; además son una fuente de proliferación de mosquitos, quienes viven en charcos estancados, que se forman en la parte interna de los neumáticos desechados. En consecuencia, ocupan una gran cantidad de espacio en vertederos, muchos de ellos ilegales, debiendo buscarse una solución a este problema, debido a los numerosos peligros que reúnen (véase Figura 1-2). Cabe destacar que los neumáticos fuera de uso (NFU) tienen una gran cantidad de usos alternativos, como su empleo en instalaciones deportivas de pasto sintético, confección de zapatos, combustible en la industria cementera, e incluso su reutilización a través del recauchado, no obstante, ninguno de estos usos tiene la capacidad de hacer frente a la cantidad de neumáticos que se desechan en nuestro país, el cual se estima en 40.000 toneladas anuales. Se debe considerar, a modo de contexto, la nueva Ley de Fomento al Reciclaje [2], que exige la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), regulando el sistema de depósito y reembolso al final del ciclo de vida de los productos considerados como prioritarios de reciclar (entre los que se encuentran los neumáticos), es por ello que se debe encontrar una vía de reutilización de los NFU, en consecuencia, la producción de asfalto a través del polvo de caucho es una interesante solución a considerar.



Figura 1-2: Incendio vertedero de Seseña, España [3].

Hasta el momento, en Chile se han usado dos métodos para agregar el caucho a la mezcla asfáltica: proceso de incorporación por vía húmeda y proceso de incorporación por vía seca. En el primero se aplica el caucho al asfalto directamente en planta, para luego añadir los agregados pétreos, siendo un trabajo de relativa complejidad, ya que se debe realizar en una planta de producción asfáltica especializada, que genere un mezclado adecuado y mejore las propiedades reológicas del asfalto de forma efectiva. En el segundo proceso se incorpora el polvo de caucho tal como un agregado más, similar a la fracción fina, lo que permite su producción por parte de empresas constructoras de carpetas asfálticas, ampliando las posibilidades de uso de los asfaltos con caucho.

Con respecto a la producción del polvo de caucho, se obtienen a través de la trituración de los NFU, y la separación de sus componentes textil y fibras de acero. La empresa Polambiente S.A. posee una planta dedicada a la trituración del neumático por medios mecánicos, que ha sido el proveedor para diferentes estudios patrocinados por el Laboratorio Nacional de Vialidad, sobre la incorporación del polvo de caucho por vía seca.

En este sentido, se acordó realizar un tramo de prueba que permitiese comparar los diferentes asfaltos modificados que existen en nuestro mercado, y analizar su utilización en una experiencia en terreno. Para esto se trabaja en la ruta E-46: Catapilco – La Laguna, la cual tiene como característica el alto tráfico de camiones cargados por el lugar, ya que es el paso natural entre las mineras precordilleranas y la Fundición Codelco Ventanas, siendo un camino de interés para analizar

el comportamiento de los asfaltos modificados, bajo las mismas condiciones de temperatura y tráfico.

1.1 Objetivos generales

El objetivo general de esta memoria es obtener una comparación de las propiedades entre una mezcla de asfalto modificado con caucho nacional, una mezcla modificada con polímero y una mezcla de asfalto multigrado, a través de sus características obtenidas mediante diversos ensayos, con mezcla extraída in situ y con mezcla confeccionada en laboratorio. Para ello se procede a la confección y seguimiento del tramo experimental Catapilco – La Laguna, ubicado entre los km 300 y km 1810 de la Ruta E-46.

1.2 Objetivos específicos

- Comparar el comportamiento de las tres mezclas con asfalto modificado, a través de los ensayos de laboratorio: Estabilidad, Fluidez, Módulo Resiliente, Ahuellamiento, Fatiga.
- Determinar cuáles son las dificultades constructivas de los asfaltos con caucho nacional NFU en terreno.
- Comparar los resultados obtenidos de la mezcla de asfalto con caucho por vía seca con 1 hora y media de digestión con los tramos de prueba anteriores (2 horas de digestión).
- Ejecutar en laboratorio ensayos para mezcla obtenida desde la finisher, y definir la cantidad de ciclos y presión a usar en el compactador giratorio y en el compactador de rodillo para lograr una densidad similar a la dosificación Marshall.
- Ejecutar un seguimiento del tramo experimental, a través de controles funcionales al pavimento en terreno.

1.3 Alcances y limitaciones

- I. El trabajo utiliza mezcla asfáltica usada en carpeta de rodadura.
- II. Los diseños usados en el tramo experimental provienen de dos fuentes: para asfalto multigrado y modificado con polímero corresponden a los entregados por el Autocontrol, mientras que para el asfalto con caucho se desarrolla en el LNV. Las mezclas asfálticas con asfalto multigrado y con asfalto modificado con polímeros se confeccionaron en planta asfáltica continua, pero no fue posible su uso para la producción de asfalto con caucho por vía seca, por lo cual fue necesario confeccionar la mezcla de asfalto con caucho en una planta discontinua.
- III. El polvo de caucho proviene de la empresa Polambiente S.A., al igual que todos los tramos experimentales realizados por vía seca en nuestro país anteriormente.
- IV. Se cuida especialmente que las partidas de árido, asfalto y caucho, sean de igual procedencia (para una misma mezcla) tanto en los ensayos de laboratorio, como la puesta en terreno.
- V. Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio Nacional de Vialidad.
- VI. El seguimiento con controles funciones al pavimento tiene una limitación temporal de dos años de dado el tránsito, debido al plazo de entrega de la memoria.

2. Marco teórico

2.1 El pavimento asfáltico

Pavimento asfáltico es un término general utilizado para las superficies de rodado que mezclan betún asfáltico, con agregados pétreos. Sus usos principales son: carreteras, calles, estacionamientos y pistas de aterrizaje.

El pavimento flexible se define como un sistema multicapas, algunas asfálticas y otras granulares. El objetivo es soportar las cargas y distribuir las presiones, tal que al llegar éstas a la sub-rasante no superen la resistencia estructural de ésta (véase Figura 2-2: Distribución de carga de la rueda bajo el pavimento).

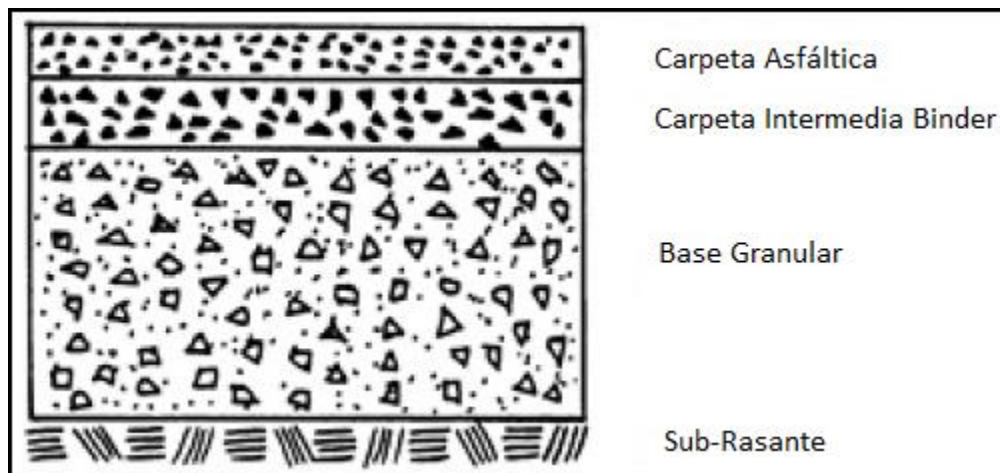


Figura 2-1: Sistema multicapas ruta E - 46, Catapilco - La Laguna [4]

Los esfuerzos disminuyen de manera paulatina, a diferencia de un pavimento rígido, por tanto, se requiere que el diseño de este paquete completo sea de buena calidad, pues debe ser capaz de resistir tanto esfuerzos de compresión como de tracción. Además, se debe asegurar que la superficie de rodado sea suave, asegurando confort, seguridad e impermeabilidad, para no dañar las capas inferiores por la infiltración de agua.

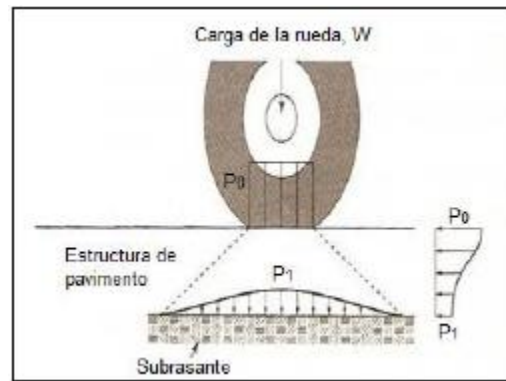


Figura 2-2: Distribución de carga de la rueda bajo el pavimento [4]

2.1.1 Diseño de pavimentos asfálticos

Se determinan los espesores de las diversas capas y las características de dichas capas, procurando entregar una solución económicamente viable, con una performance de rodado adecuada para el usuario. En la actualidad se utilizan herramientas computacionales para determinar esfuerzos y deformaciones en el pavimento, optimizando el diseño.

Existen variados factores que determinan el desempeño del pavimento, entre los que se encuentran: tráfico, capacidad de soporte de la subrasante, temperatura del lugar, clima, materiales utilizados, calidad de la construcción y diseño adecuado.

Generalmente, se diseñan las siguientes capas:

- Sub-base granular
- Base granular
- Capa base asfáltica
- Capa intermedia (binder)
- Capa de rodadura

2.1.2 Deterioros

En la capa de rodadura, producto del uso, el tiempo y factores ambientales, se producen deterioros, los cuales se pueden clasificar por su forma de manifestación. Obsérvese que estos pueden ocurrir simultáneamente, siendo habitual la predominancia de alguno.

- Fracturas: se manifiesta principalmente en el agrietamiento del pavimento, asociado a cargas de tráfico (fatiga), reflexión de grietas (de abajo hacia arriba) o factores climáticos.



Figura 2-3: Pavimento con deterioro por fatiga

- Distorsiones: provocan deformaciones permanentes en el asfalto, se identifica por la fluencia del pavimento (ahuellamiento o corrugación), densificación o deslizamiento horizontal de la carpeta.



Figura 2-4: Pavimento con deterioro por ahuellamiento [5]

- Desintegración: se observan desprendimientos entre el asfalto y el agregado.



Figura 2-5: Pavimento con deterioro por desprendimiento de los agregados

2.2 Mezcla asfáltica en caliente

Este tipo de mezcla es la más usada, por su durabilidad y resistencia, siendo la que se utilizará en este estudio. Dentro de este grupo destacan los asfaltos tradicionales, modificados con polímeros y asfalto multigrado.

Para su fabricación, se mezcla betún asfáltico, agregados pétreos y opcionalmente algún modificador (como el polímero o el polvo de caucho); utilizándose aproximadamente un 5% de asfalto con respecto al peso de los agregados, para mezclas convencionales.

En general, su fabricación se realiza en una planta asfáltica. Se llevan los áridos y el ligante a la temperatura de mezclado, para posteriormente mezclar ambos componentes, hasta que los áridos queden embebidos con asfalto, luego se carga un camión tipo tolva, el cual llevará la mezcla a terreno. Una vez en el camino, se acopla una finisher al camión, desde donde se extiende la mezcla en el camino, luego se compacta la carpeta para lograr la densidad deseada, usando rodillos: primero lisos, luego neumáticos. Cuando el pavimento está lo suficientemente frío, ya se puede dar a tránsito.



Figura 2-6: Carpeta asfáltica tras proceso de compactación

2.2.1 Cemento asfáltico

El cemento asfáltico tradicional es un material semi-sólido, viscoso, adherente y de color negro, usado como aglomerante en las mezclas asfálticas.

Este cemento puede ser mejorado a través de la modificación del asfalto, que contribuye a resistir el deterioro (fatiga, ahuellamiento y agrietamiento térmico), puesto que entrega mayor viscosidad al asfalto en temperaturas altas y mayor elasticidad en temperaturas bajas; y ayuda a inhibir la propagación de grietas.

Entre los modificadores más utilizados se encuentran: polímeros, modificadores químicos, procesos especiales de refinación, asfaltos naturales y “fillers”.

2.2.1.1 *Propiedades físicas*

El asfalto es un material aglomerante, resistente, adhesivo, impermeable y duradero, con capacidad de resistir altos esfuerzos instantáneos, fluir ante el calor o ante cargas permanentes; siendo una sustancia plástica que entrega flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se le combina usualmente.

2.2.1.2 *Propiedades químicas*

El asfalto es una mezcla de hidrocarburos y compuestos heterocíclicos que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno, casi en su totalidad solubles en sulfuro de carbono. En el proceso de refinación, los hidrocarburos pesados y las moléculas de mayor complejidad quedan como residuo, al ser extraídos los hidrocarburos livianos de un crudo, los pesados no pueden mantenerse en disolución y se unen por absorción a las partículas coloidales existentes. Las moléculas más livianas constituyen el medio dispersante. Los hidrocarburos constituyentes del asfalto forman una solución coloidal en la que un grupo de moléculas de los hidrocarburos más pesados (asfaltenos) están rodeados por

moléculas de hidrocarburos más ligeros (resinas), sin que exista una separación entre ellas, sino una transición ocupando el espacio restante de los aceites.

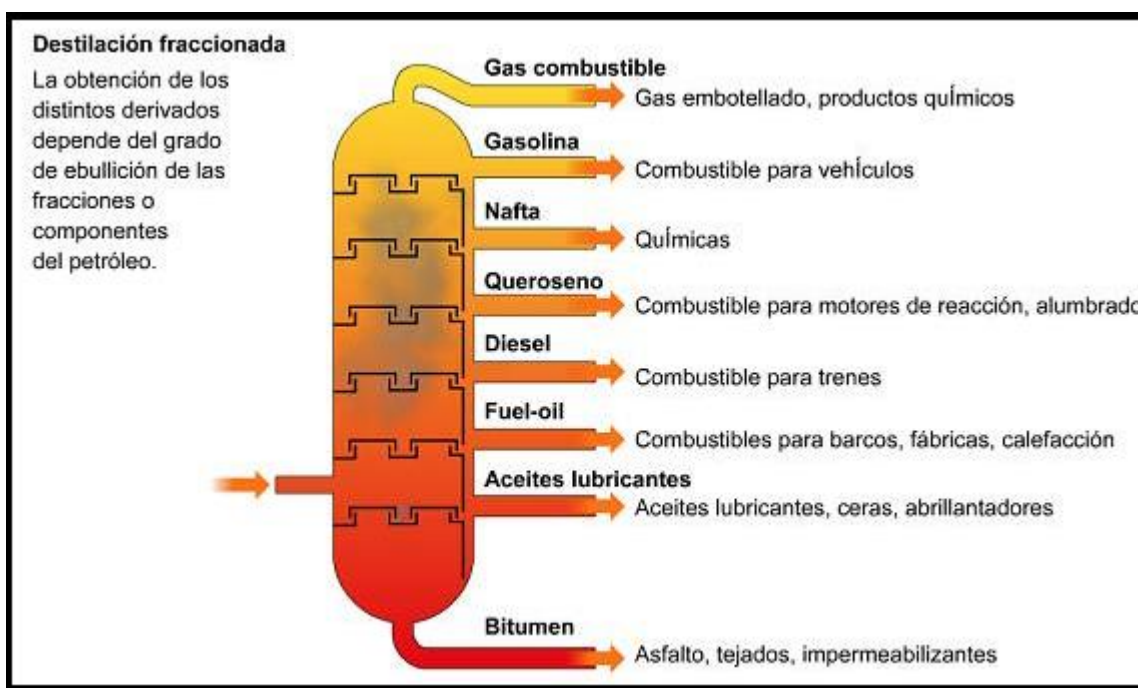


Figura 2-7: Destilación fraccionada del petróleo [6]

En general, el asfalto tiene dos componentes mayoritarios: el primero es una mezcla de asfaltenos, que son moléculas complejas de alto peso molecular, no soluble en n-heptano y soluble en compuestos aromáticos (como el benceno); el segundo componente son los maltenos, solubles en n-heptano, los componen aceites y resinas. Estos dos componentes constituyen un sistema coloidal, los asfaltenos entregan las características estructurales y de dureza a los asfaltos, las resinas le entregan las propiedades aglutinantes y los aceites la consistencia que asegura su trabajabilidad.

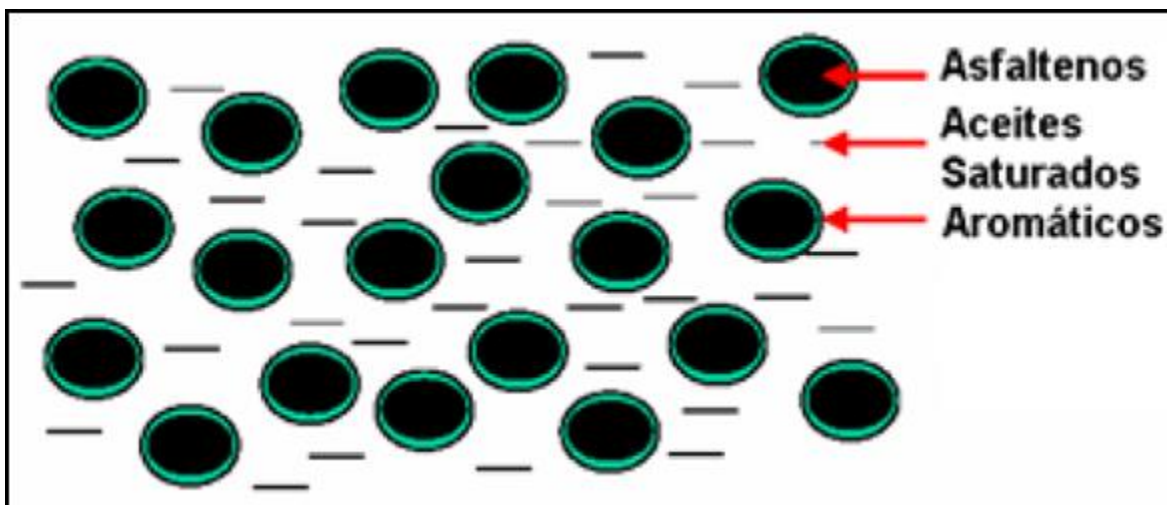


Figura 2-8: Composición química del asfalto [4]

2.2.2 Agregados pétreos

Los áridos en la mezcla asfáltica representan alrededor del 90-95% del peso, y entre el 75-85% del volumen. Se divide en áridos gruesos, áridos finos, “filler” o polvo mineral, en proporciones bien determinadas. Según 5.408.201 del M.C.- V.5, el árido grueso se define como aquel retenido por malla n°8, mientras que el árido fino es el que pasa dicha malla, por otra parte, se puede adicionar polvo mineral, el que se conforma por material inerte de origen calizo que pasa la malla n°30.

Idealmente, el agregado debe tener:

- Adecuado tamaño y distribución granulométrica.
- Suficiente resistencia y tenacidad.
- Partículas angulares y equidimensionales en diferentes direcciones.
- Porosidad moderada a baja.
- Superficie limpia, hidrofóbica y áspera.

Para ello, se asegura a través de la caracterización de los agregados de acuerdo con lo indicado en 5.408.2 del M.C.-V.5.

2.2.2.1 Granulometría

La granulometría es la distribución porcentual en masa de los tamaños de partículas del agregado pétreo. Se determina mediante tamizado, existiendo dos procedimientos, el tamizado seco y el tamizado húmedo. En el tamizado seco se pasa el material a través de una serie de tamices de abertura estandarizada, midiéndose la masa retenida en cada tamiz, según el procedimiento establecido en 8.202.3 del M.C.-V.8. Como el tamizado seco no permite determinar el contenido de partículas bajo la malla n°200, pues estas partículas se adhieren a las de mayor tamaño, se aplica el tamizado húmedo, donde se lava el material de acuerdo con el procedimiento indicado en 8.202.4 del M.C.-V.8.

El procedimiento completo consiste en realizar un tamizado húmedo seguido de un tamizado seco.

Se distinguen granulometrías de tipo uniforme (sólo un tamaño de partícula), graduación continua o densa (distribución relativamente homogénea de tamaños) y graduación discontinua (presencia de agregados finos y gruesos, mas no intermedios). Se pueden identificar según su cantidad de material fino, por lo establecido en 5.408.201(4) del M.C.-V.5, tal como:

- Granulometría fina: 50-65% material fino.
- Granulometría densa: 35-50% material fino.
- Granulometría semidensa: 28-42% material fino.
- Granulometría gruesa: 20-35% material fino.
- Granulometría abierta: 5-20% material fino.

2.2.2.2 Forma de partículas

Se reconocen agregados de tipo cúbico (chancado) con forma angular y superficie rugosa, y los agregados redondeados (rodado). El comportamiento al corte de los primeros es mucho mejor ya que generan buena trabazón, por lo que se prefiere este tipo.

Así también se reconocen formas de las partículas. La mejor trabazón se obtiene con partículas de esquinas filosas y de forma cúbica. Las partículas planas y alargadas (lajas) retardan y dificultan la

compactación, puesto que se quiebran generando caras sin recubrimiento asfáltico, disminuyendo la resistencia.

2.2.2.3 Textura superficial

La seguridad en la circulación por las carreteras es un tema que concierne seriamente el diseño de los caminos modernos; se debe considerar que los accidentes por deslizamiento son producto de múltiples factores: comportamiento del conductor, el vehículo, la carretera en su conjunto y las influencias externas. Se puede aportar a disminuir los accidentes al mejorar la adherencia del neumático al pavimento.

La textura superficial, se prefiere rugosa, pues contribuye a la resistencia de una mezcla asfáltica. La resistencia al deslizamiento es el parámetro que logra medir fricción entre neumático y pavimento. Se busca principalmente disminuir la distancia de parada y el control total del conductor sobre la dirección del vehículo. Para estos dos casos se evalúa el roce en sus direcciones: longitudinal, donde un alto índice permite disminuir la distancia de parada, y transversal, que mejora el manejo en curvas y en casos de derrape.

El roce se produce por las irregularidades del pavimento, divididas en microtextura y macrotextura; la microtextura hace referencia a las irregularidades de longitud de onda menor a 0,5 [mm], y sirve para establecer la aspereza del pavimento, mientras que la macrotextura son irregularidades de 0,5 a 50 [mm] que se asocian a la rugosidad del pavimento.

Para que un pavimento tenga la adherencia requerida, debe tener una macrotextura que permita la expulsión del agua y una microtextura que proporcione adherencia.

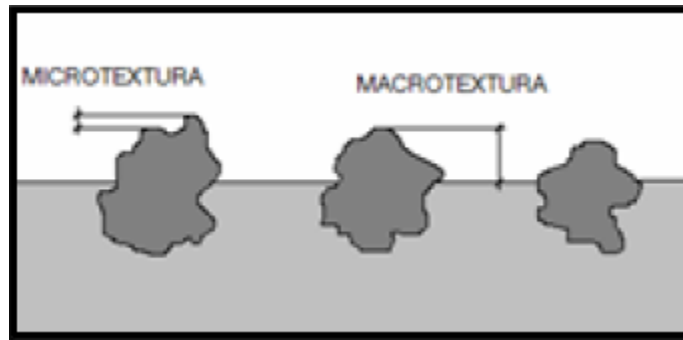


Figura 2-9: Textura superficial del pavimento asfáltico [4]

El coeficiente de fricción a baja velocidad depende de la cantidad de puntos de contacto entre los áridos secos y el neumático. Al subir la velocidad, baja la fricción; esta baja es menor mientras mejor sea la evacuación de agua, entregada por la macrotextura (mayor cuando más gruesa es). En consecuencia, el equilibrio entre las dos texturas es clave para conseguir el buen comportamiento de la capa de rodadura.

Los ensayos que apuntan a obtener una correcta fricción en el pavimento, exigidos por el Manual de Carreteras, son:

- Angularidad del agregado grueso (cubicidad): MC 8.202.6
- Contenido de partículas alargadas y planas en el agregado grueso: MC 8.202.6
- Vacíos en el agregado grueso sin compactar: MC 8.202.19

2.2.3 Asfaltos modificados

Se encuentra aceptado que los asfaltos convencionales poseen propiedades adecuadas, tanto mecánicas como físicas para resistir distintas condiciones climáticas y de tránsito; sin embargo, en la actualidad, al aumentar notoriamente el parque automotor, los volúmenes de tránsito son más intensos, sumado a la sobrecarga con que circulan algunos vehículos de carga y el incremento en la presión de inflado de los neumáticos, hacen que usar asfalto tradicional habitualmente no cumpla con los años de servicio inicialmente proyectados.

Por esta razón, se hizo necesaria la elaboración de una técnica para aumentar las capacidades de las mezclas asfálticas. Así fue como al modificar los asfaltos convencionales, se obtuvieron mejoras en las características mecánicas (resistencia a las deformaciones) y susceptibilidad térmica.

El objetivo es generar asfaltos más rígidos en el rango de temperaturas altas de servicio, y asfaltos más dúctiles en bajas temperaturas.

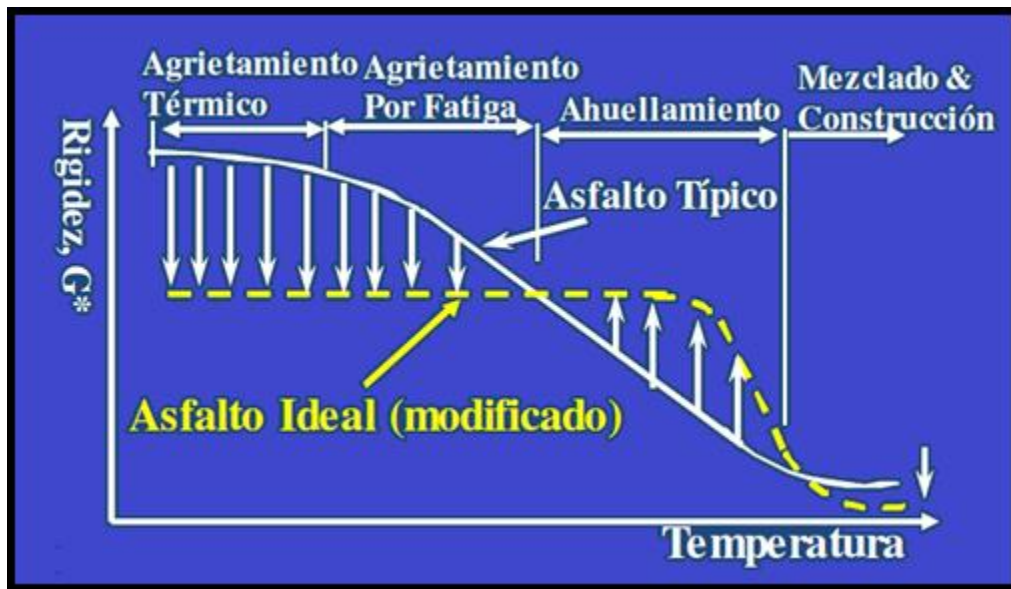


Figura 2-10: Gráfica cualitativa de rigidez versus temperatura para asfalto tradicional y modificado [4]

Entre los modificadores más populares se encuentran:

- Polímeros (elastómeros)
- Procesos especiales de refinación (multigrado)
- Modificadores químicos (azufre)
- Fillers

2.2.3.1 Polímeros

Los polímeros son sustancias de alto peso molecular, conformado por la unión de miles de moléculas pequeñas de monómeros; formándose moléculas de gran tamaño de diversas formas (escaleras, cadenas unidas, cadenas largas o sueltas).

Al modificar el asfalto con polímeros, se cambian las propiedades físicas y reológicas, generando una sustancia estable en el tiempo y a los cambios de temperaturas, disminuyendo la susceptibilidad térmica y a la humedad, así como la oxidación.

Químicamente, los modificadores provocan una actividad superficial iónica, incrementando la adherencia entre el material pétreo y el betún asfáltico. Físicamente, aumenta la resistencia a esfuerzos repetidos (luego, a la fatiga) y reduce el agrietamiento.

Los modificadores habitualmente se insertan en el asfalto antes de mezclarse con el material pétreo. Si un polímero se añade a dos diferentes asfaltos, se pueden obtener resultados absolutamente distintos; para asegurar la efectividad, se debe crear una red continua de trabajo en el asfalto; para que esto ocurra, la química del polímero y del asfalto necesita ser compatible.

Para que los asfaltos modificados tengan las capacidades óptimas, se debe seleccionar cuidadosamente el asfalto base, el tipo de polímero, la dosificación, la elaboración y las condiciones de almacenaje.

Considerando su estructura y propiedades se clasifican como:

- I. Termo-endurecibles: se forman con la reacción química entre dos componentes, generando una estructura entre cruzada la cual no puede volver a transformarse (resinas epóxicas, poliéster, poliuretano).
- II. Termo-plásticos: polímeros solubles que se reblandecen por la acción del calor y pueden llegar a fluir. A temperatura ambiente recuperan su consistencia.

En los termoplásticos tenemos a los plastómeros y los elastómeros. Los plastómeros fluyen sin recuperar su longitud inicial; los elastómeros tienen estructuras reticuladas confiriéndosele propiedades elásticas, siendo estos últimos los que concitan el interés para este estudio.

Dentro de los elastómeros más usados, se encuentran:

- Estireno-butadieno-estireno (SBS): mejora el comportamiento de las mezclas en altas y bajas temperaturas. Es fabricado con base a bloques de estireno, en polímeros elastómeros radiales del tipo tribloque. Se usa en pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones utilizadas en tratamientos superficiales.
- Poliisopropeno: también conocido como caucho natural, es un hidrocarburo elástico (C_5H_8) que se extrae de una emulsión lechosa (látex) proveniente de la savia de las plantas, pero también puede ser producido sintéticamente. También se ocupa para mejorar el comportamiento de los asfaltos ante tráfico alto y cambios bruscos de temperatura.
- Goma reciclada: caucho reciclado desde neumáticos fuera de uso, mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o cambios de temperatura. Se utiliza en carpetas de granulometría semi-densa, abierta y en tratamientos superficiales. En este contexto, se tiene una opción ambientalmente amistosa, que además mejora las cualidades del asfalto.

2.3 Asfalto con caucho

Hasta hace algunos años, la mayoría de los neumáticos terminaba en vertederos ilegales, no obstante, hoy en día se han transformado en la materia prima de una moderna industria, que ha recolectado más de un millón de neumáticos en nuestro país y provocó la eliminación de 40 vertederos.

Para el año 2016, en Chile se generan casi 15 millones de neumáticos (159 toneladas de residuos), entre los cuales sólo se recolecta el 5%. Actualmente, se cuenta con una planta dedicada al reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU): Polambiente, destinada a congrega los neumáticos de las regiones V, VI y Metropolitana. Por otro lado, se estima que en la industria minera se desechan al menos 32.000 toneladas, que hasta el momento no se encuentran en el universo reciclable.

2.3.1 El caucho

El caucho natural se presenta en forma de suspensión coloidal en el látex de las plantas productoras de caucho. El más usado es el proveniente del árbol del hule (“castilloa elástica”) de donde proviene el 90% del caucho en su estado natural. En contraposición, el caucho sintético se prepara a través de hidrocarburos insaturados.

2.3.1.1 Caucho natural

Naturalmente, el caucho se encuentra en árboles de la especie “*Hevea Brasiliensis*”, de la familia de las Euforbiáceas, originario de la Amazonía y en el hule, originario de México. No obstante, la mayor producción se encuentra en el sudeste asiático, China e India, llegando al 90% de la fabricación mundial.

El caucho bruto en estado natural es un hidrocarburo blanco o incoloro. El compuesto de caucho más simple es el isopreno o 2-metilbutadieno, cuya fórmula química es C_5H_8 . A la temperatura de 195 °C bajo cero, el caucho puro es un sólido duro y transparente. De 0 a 10 °C es frágil y opaco, y por encima de 20 °C se vuelve blando, flexible y translúcido. Al amasarlo mecánicamente o al calentarlo por encima de 50 °C, el caucho adquiere una textura de plástico pegajoso y se descompone a temperaturas superiores a 200 °C. El caucho puro es insoluble en agua, álcali o ácidos débiles, y soluble en benceno, petróleo, hidrocarburos clorados y disulfuro de carbono. Con agentes oxidantes químicos se oxida rápidamente, pero con el oxígeno de la atmósfera lo hace lentamente.

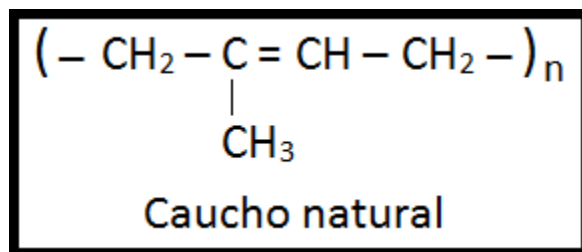


Figura 2-11: Fórmula molecular del caucho natural

El caucho sintético se obtiene por reacciones químicas, conocidas como condensación o polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados. Los compuestos básicos del caucho sintético llamados monómeros, tienen una masa molecular relativamente baja y forman moléculas gigantes denominadas polímeros. Los principales tipos de caucho sintético son: neopreno, buna o caucho artificial, caucho de butilo y otros cauchos especiales.

2.3.2 El neumático fuera de uso

Los neumáticos son estructuras con forma toroidal, están formados por una banda de rodamiento elástica, una cintura prácticamente inextensible y una estructura de arcos radialmente orientados sobre una membrana inflada y finalizando en arcos inextensibles que sirven como fijación para las llantas de las ruedas.

Debido al estado de avance de la tecnología en su desarrollo, ha llevado a sumar diferentes componentes en cada una de sus partes; en consecuencia, son estructuras complejas desarrolladas con más de doscientos elementos. El principal de ellos es el caucho, que representa al menos la mitad del peso, pudiendo ser de origen natural o sintético.

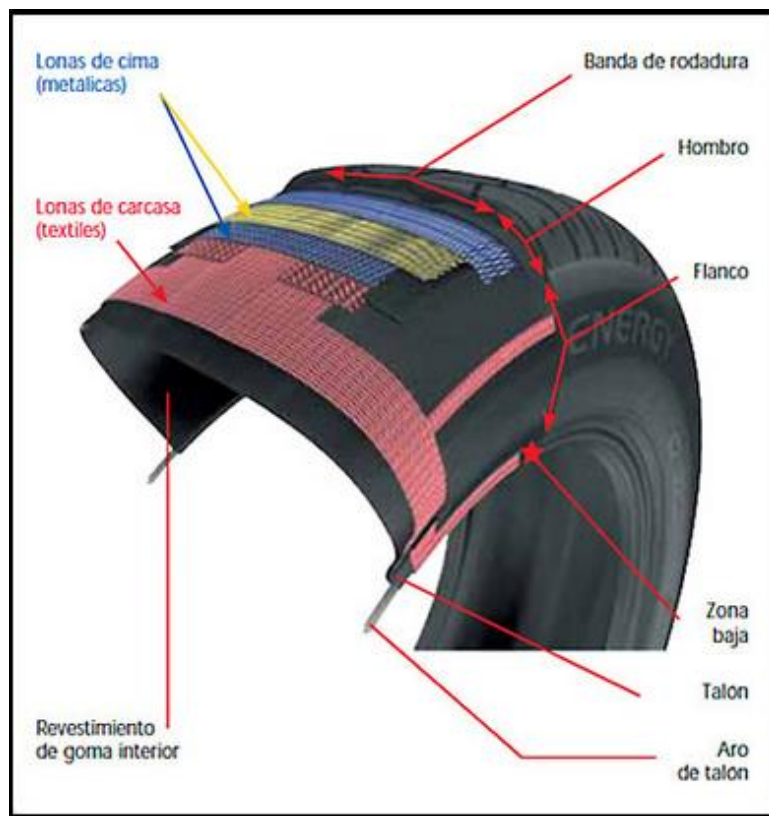


Figura 2-12: Sección del neumático fuera de uso

La clasificación de los neumáticos se puede realizar según el tipo de vehículo que los usa. Los de automóvil tienen un diámetro exterior menor a 60 [cm] y pesan aproximadamente 8 kilos, los neumáticos de camión tienen un diámetro exterior de 140 [cm] y de peso cercano a los 65 [kg]. Así como su diferencia en peso y porte, también se varía la cantidad de caucho, estimándose un 65% para los automóviles y un 72% para los camiones.

2.3.2.1 Marco normativo de los neumáticos fuera de uso

En este momento, en Chile no existe un marco normativo específico para el reciclaje de neumáticos; no obstante, durante 2016 se ha aprobado la Ley de Fomento al Reciclaje, la que permite impulsar políticas públicas para disminuir la generación de residuos y valorizar los ya generados que se consideren prioritarios (entre los que se encuentran los neumáticos).

Con estos antecedentes, se espera potenciar el uso de neumáticos fuera de uso, principalmente en obras viales donde su uso entrega mejoras sustanciales en el rendimiento de los pavimentos, considerando que varios países como Estados Unidos, Canadá, España y Brasil han incorporado este tipo de mezclas.

2.3.2.2 Proceso de trituración

Se reconocen dos formas de triturar el caucho, uno a temperatura ambiente y el otro de forma criogénica. El primero es un proceso netamente mecánico, donde el tamaño final depende de las etapas en que ha sido sometido. La trituración criogénica, es un proceso realizado a bajas temperaturas, provocando fragilidad en el caucho facilitando su destrozo.

Para la obtención del caucho, se trituran los neumáticos, separándose de los demás componentes como el acero y la fibra textil: el acero es separado mediante el uso de imanes, la fibra es aislada mediante aspiración y selección.

El polvo de caucho de NFU nacional se clasifica según su banda granulométrica en tres tipos: P-1 (tamaño máximo nominal de 1,25 [mm]), P-2 (tamaño máximo nominal de 0,63 [mm]), y P-3 (tamaño máximo nominal de 0,315 [mm]).

Tabla 2-1: Granulometría del polvo de caucho, NCh 3258-2012

Tamiz [mm]	P-1 [%]	P-2 [%]	P-3 [%]
2,30	100	-	-
1,25	60-100	100	-
0,63	30-80	40-100	100
0,32	15-60	10-70	30-60
0,16	0-40	2-40	0-30
0,08	0-20	0-20	0-18

Según la norma NCh 3258-2012 el caucho nacional debe cumplir con ciertos requisitos químicos y físicos:

- I. La densidad relativa de las partículas de caucho, determinada según UNE-53526, debe estar comprendida en el intervalo $1,15 \pm 0,05$. El contenido de agua debe ser menor que 0,75%. La determinación se debe realizar de acuerdo con la norma NCh 1515, excepto en lo relativo a la temperatura de calentamiento en horno, que debe ser de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. La granulometría del polvo de caucho debe estar comprendida dentro de alguna de las bandas indicadas en la Tabla 2.1.
- II. Las tolerancias en la granulometría del material suministrado, respecto a la granulometría media establecida por el fabricante para cada partida, son de 7% para tamices menores o iguales que 1 mm y 10% para los tamices mayores que 1 [mm].
- III. Con respecto a la composición química del polvo de caucho debe informarse el contenido de: extracto acetónico, cenizas, negro de carbono, azufre y caucho natural. El contenido máximo de cenizas debe ser 18,5%.

2.3.3 Incorporación del caucho en la mezcla bituminosa

El caucho proveniente de los neumáticos fuera de uso puede ser incorporado mediante tres procesos distintos: vía seca, vía húmeda y por refinería.

2.3.3.1 Proceso por vía seca

En este proceso, el caucho reciclado se une a los agregados pétreos con anterioridad de adicionar el cemento asfáltico. Los granos de caucho no pueden considerarse como material inerte, pues interaccionan con el ligante de la mezcla asfáltica, mediante el proceso de digestión (que se consigue dejando en reposo el asfalto con el neumático fuera de uso durante un tiempo establecido), el caucho pasa de ser un árido elástico a ser un modificador del ligante de la mezcla.

El proceso de digestión comienza desde el exterior de la partícula hacia el interior, y será más rápido cuando:

- Más fino sea el polvo.
- Menor proporción de polvo exista dentro de la mezcla.
- Mayor sea la temperatura de la mezcla, conjunto con el tiempo que se mantenga durante el proceso de fabricación y puesta en obra.

Tomando en cuenta que el tiempo de mezclado es notoriamente menor en este caso, se debe asegurar una reacción similar entre el asfalto y el caucho como en el proceso húmedo. Por esta razón debe existir un tiempo de digestión, con el fin de obtener esta interacción entre ligante y caucho. En caso de no conseguirse esta digestión, no se produce la modificación del cemento, generándose una mezcla de peores propiedades que una tradicional.

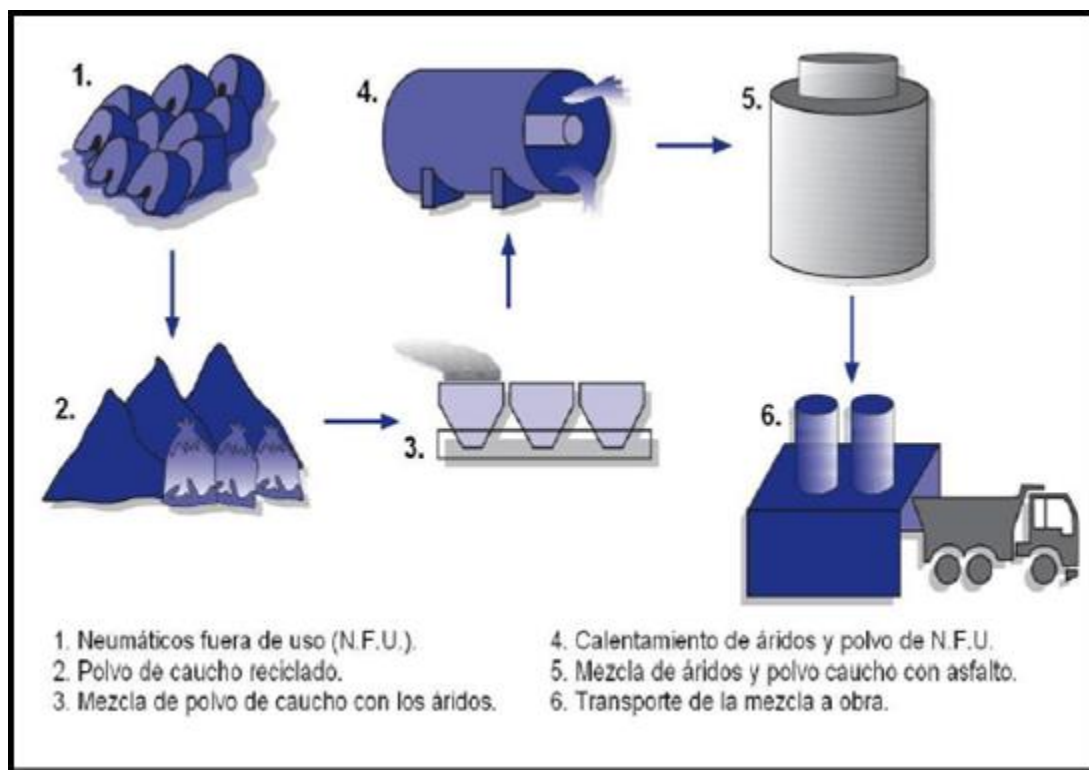


Figura 2-13: Proceso de fabricación de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho por vía seca [7]

El polvo debe cumplir con las exigencias de la Norma NCh 3258-2012: Mezcla Asfáltica – Polvo de Caucho proveniente de neumáticos fuera de uso – Requisitos.

2.3.3.2 Proceso por vía húmeda

Se incorpora el caucho al ligante, generalmente entre un 5 y un 24% con respecto al peso del cemento asfáltico. La temperatura y tiempo de mezclado a los cuales se debe realizar el mezclado para alcanzar la viscosidad requerida entre 180 y 210 [°C], por 1 a 4 horas. La alta temperatura causa que el caucho se hinche por la absorción de aceites aromáticos de asfalto.

La viscosidad depende del tipo de asfalto, del tipo de caucho, de la cantidad de caucho, de la temperatura de mezclado y del grado de agitación mecánica durante el mezclado.

Luego de terminado el mezclado, la mezcla se transporta al lugar de pavimentación y se procede a colocar y compactar, para esto último se usa rodillo liso de doble tambor y rodillo neumático.

Los granos de caucho al combinarse con el cemento asfáltico reaccionan con éste, inflándose y ablandándose debido a la absorción de aceites aromáticos. Las partículas hinchadas se tornan pegajosas, desarrollando propiedades adhesivas. Asimismo, al reducirse los aceites aromáticos que lubrican la mezcla, se tiene mayor viscosidad. Este proceso se asemeja a lo sucedido con una esponja seca y dura al sumergirla en agua: la esponja absorbe el agua, se hincha y ablanda.

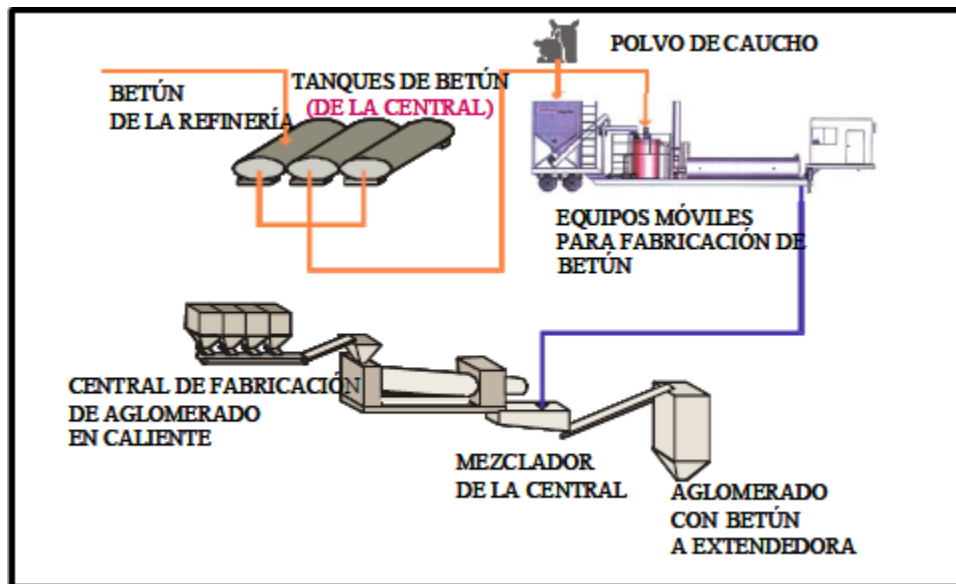


Figura 2-14: Proceso de fabricación de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho por vía húmeda [7]

El nivel de modificación del ligante depende de varios factores, entre los cuales se encuentran: el tamaño, textura y proporción de los granos de caucho, tipo de cemento asfáltico, tiempo y temperatura de mezclado, grado de agitación mecánica durante la reacción de la mezcla y el componente aromático del cemento asfáltico.

El principal parámetro para vigilar la reacción es la viscosidad de la mezcla, por esta razón debe ser supervisada en distintos intervalos de tiempo durante el mezclado y el tiempo de reacción, hasta lograr la viscosidad requerida.

2.3.3.3 Proceso por refinería

El mezclado en refinería es similar al proceso húmedo, variando en que la digestión del caucho con el ligante se realiza en la fábrica, directamente con el asfalto que resulta de la destilación del crudo. Este ligante modificado se transporta a obra donde se combina con los áridos y “filler” para producir la mezcla asfáltica.

2.3.3.4 Proceso por vía húmeda acelerada

Se trata de un nuevo método de incorporación, aún en estudio, que busca combinar el buen control de la digestión del caucho que se logra con vía húmeda con la facilidad de incorporación por vía seca. Se realiza un pre-tratamiento al caucho con cera fundida, mejorando la adherencia caucho-bitumen (problema de la vía seca), disminuyendo también la viscosidad, reduciendo la temperatura de trabajo con el consiguiente ahorro de energía que esto provoca, acortando los tiempos de trabajo del método de vía húmeda. A temperatura de servicio se tiene una buena resistencia a las deformaciones y se obtienen propiedades altamente elásticas. [8]

2.4 Método de diseño de carpeta de rodadura

El método de diseño utilizado en Chile, hasta el momento, es el método Marshall, que se basa en el empleo de ensayos mecánicos, bajo el procedimiento detallado en 8.302.47 del M.C-V.8.

El concepto del método Marshall en el diseño de mezclas fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, gracias a una extensa investigación, con estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento, desarrollando un criterio de diseño de mezclas.

El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos arriba de 38 [mm] (1.5”), y está pensado para diseño en laboratorio y control en terreno de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa. El método Marshall utiliza probetas de prueba estándar de 64 [mm] (2 ½”) de alto y 102 [mm] (4”) de diámetro, se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto con agregado, expuesto en 8.302.47 del M.C-V.8. Los dos aspectos principales del método Marshall son la densidad - análisis de vacíos, y la prueba de estabilidad y fluidez de las probetas compactadas.

La compactación de la mezcla dentro de los moldes se realiza a través del martillo Marshall. Las probetas se compactan con 75 golpes por cara, o como se especifique según el tránsito de diseño.

Mediante la elaboración de probetas con distintos contenidos de cemento asfáltico, se obtienen los parámetros Marshall, con los cuales se determina el porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla. Las temperaturas de mezclado y de compactación dependen del cemento asfáltico que se utilice para fabricar las probetas.

La estabilidad de la probeta es la resistencia máxima que esta alcanza cuando es sometida a compresión, usando un anillo de carga. Antes de realizarse el ensaye la probeta es acondicionada por un período de 30 a 45 minutos en un baño termostático a 60 [°C]. El valor de flujo es la deformación alcanzada, medida en unidad de 0,25 [mm] (1/100 [pulgada]) que experimenta la probeta en el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad, la compresión se desarrolla a una velocidad de 50 [mm/min].

3. Ensayos para verificación del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente

Todos los materiales constituyentes de la mezcla asfáltica deben ser sometidos a una serie de ensayos que permitan su caracterización, para asegurar su calidad y desempeño en la carpeta. Así se tienen que evaluar los agregados, cementos asfálticos, caucho y la mezcla asfáltica.

3.1 Agregados pétreos

Los áridos deben cumplir con los requisitos específicos que se exigen en el manual de carreteras. Para este estudio se evalúan las propiedades competentes a la capa de rodadura, que es la capa a analizar.

Los ensayos pedidos se especifican en 5.408.201 del M.C.-V.5, tanto para la parte gruesa como la parte fina. Los procedimientos específicos que se deben seguir se encuentran en el capítulo 8.200 del Manual de Carreteras.

3.1.1 Fracción gruesa

Debe constituirse con partículas chancadas sobre el tamiz n°8, tenaces, limpias (libres de materia orgánica, arcilla o materias extrañas). Los requisitos de la fracción fina son los siguientes:

Tabla 3-1: Exigencias fracción gruesa del árido según Manual de Carreteras

Ensaye	Tipo de Mezcla Asfáltica				Método
	Rodadura [%]	Intermedia [%]	Base		
			Gruesa [%]	Abierta [%]	
Desgaste de Los Ángeles (máx.)	25	35	35	30	8.202.11
Desintegración en Sulfato de Sodio (máx.)	12	12	12	12	8.202.17
Partículas Chancadas (mín.)	90	70	60	90	8.202.6
Partículas Lajeadas (mín.)	10	15	15	10	8.202.6
Adherencia Método Estático (mín.)	95	95	95	95	8.302.29
Adherencia Método Dinámico	95	95	95	95	8.302.31

3.1.2 Fracción fina

Esta fracción debe estar constituida por agregados provenientes de la trituración de rocas y gravas que pasen el tamiz n°8. Deben ser partículas duras, tenaces y libres de arcilla. Se deben ajustar a los requisitos siguientes.

Tabla 3-2: Exigencias fracción fina del árido, según Manual de Carreteras

Ensaye	Tipo de Mezcla Asfáltica				Método
	Rodadura [%]	Intermedia [%]	Base		
			Gruesa [%]	Abierta [%]	
Índice de Plasticidad	NP	NP	NP	NP	8.102.4
Adherencia Riedel – Weber (mín.)	0 – 5	0 – 5	0 – 5	0 - 5	8.302.30
Desintegración Sulfato de Sodio (% máx.)	15	15	15	15	8.202.17

3.1.3 Mezcla de áridos

Las distintas fracciones de áridos deben combinarse en proporciones tales que la mezcla cumpla con alguna de las bandas granulométricas descritas en 5.408.201 (4) del M.C.-V.5. En este estudio se utiliza una mezcla semi-densa: IV-A-12.

Tabla 3-3: Granulometría de tipo semi-densa

Denominación		IV – A – 12	IV – A – 20
Tamices		Porcentaje que pasa en peso	
[mm]	ASTM		
25	1		100
20	3/4	100	80 – 95
12,5	1/2	80 – 95	65 – 80
10	3/8	70 – 85	57 – 73
5	Nº4	43 – 58	40 – 55
2,5	Nº8	28 – 42	28 – 42
0,63	Nº30	13 – 24	13 – 24
0,315	Nº50	8 – 17	8 – 17
0,16	Nº100	6 – 12	6 – 12
0,08	Nº200	4 – 8	4 - 8

3.2 Cemento asfáltico

La caracterización de los asfaltos, y los ensayos ocupados para ello, dependen del tipo de cemento utilizado.

Para el cemento asfáltico según grado de viscosidad absoluta CA 24, de acuerdo con lo indicado en 8.301.1 del MC-V8.

Tabla 3-4: Exigencias para cemento asfáltico tradicional, según Manual de Carreteras

Ensayes	Grado de Viscosidad	
	CA 24	CA 14
Viscosidad absoluta a 60°C, 300 mm Hg, poises	Mín. 2400	Mín. 1400
Penetración 25°C, 100 g, 5 s, 0.1 mm	Mín. 40	Mín. 40
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	Mín. 100	Mín. 100
Ensaye de la mancha (% xilol)	Máx. 30%	Máx. 30%
Solubilidad en tricloroetileno, %	Mín. 99	Mín. 99
Punto de inflamación, °C	Mín. 232	Mín. 232
Punto de ablandamiento, °C	Informar	Informar
Índice de penetración	-2.0 a +1.0	-2.0 a +1.0
Película delgada rotatoria		
Pérdida por calentamiento, %	Máx. 0.8	Máx. 0.8
Viscosidad absoluta a 60°C, 300 mm Hg, poises	Informar	Informar
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	Mín. 100	Mín. 100
Índice de durabilidad	Máx. 4	Máx. 4

Los métodos de ensaye son los siguientes:

- Muestreo Método 8.302.1
- Punto de Inflamación Método 8.302.10
- Viscosidad Cinemática Método 8.302.13
- Destilación Método 8.302.4
- Penetración Método 8.302.3
- Ductilidad Método 8.302.8
- Solubilidad en Tricloroetileno Método 8.302.11
- Ensaye de la Mancha Método 8.302.7
- Viscosidad Absoluta Método 8.302.15

En el caso de usar cemento asfáltico modificado con polímero, se deben cumplir las exigencias establecidas en la tabla 5.408.202.A del MC-V5.

Tabla 3-5: Exigencias para cemento asfáltico modificado con polímeros

Ensayes	Exigencia	
	CA 60 – 80	CA 80 – 100
Penetración 25°C, 100 g, 5 s, 0.1 mm	60 – 80	80 – 100
Punto de ablandamiento, °C	Informar	Informar
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	Mín. 80	Mín. 80
Recuperación elástica, 13°C, 20 cm, 1h. %	Mín. 50	Mín. 50
Recuperación elástica por torsión, 25°C, %	Informar	Informar
Índice de penetración	Mín. +2	Mín +2
Índice Fraass, °C	Máx. -17	Máx. -17
Punto de inflamación, °C	Mín. 235	Mín. 235
Ductilidad, 5°C, 5 cm/min, cm	Mín. 50	Mín. 50
Estabilidad al almacenamiento	Informar	Informar

Los cementos asfálticos del tipo multigrado deben cumplir con las exigencias de la tabla 5.408.202.B del M.C.-V.5.

Tabla 3-6: Exigencias para cemento asfáltico multigrado

Ensayes	Exigencia	
	CA 40 – 60	CA 60 – 80
Penetración 25°C, 100 g, 5 s, 0.1 mm	40 – 60	60 – 80
Punto de ablandamiento, °C	Mín. 55	Mín. 52
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	Mín. 80	Mín. 80
Punto de Inflamación, °C	Mín. 235	Mín. 235
Viscosidad Brookfiels, 60°C, poises	7.000 – 13.000	5.000 – 11.000
Índice de penetración	Mín. + 0.3	Mín. + 0.3
PDR		
Pérdida por calentamiento, %	Máx. 1.0	Máx. 1.0
Viscosidad Brookfiels, 60°C	Informar	Informar
Penetración, % original	Mín. 54	Mín. 54
Índice Fraass, °C	Máx. -17	Máx. -17

3.3 Polvo de caucho

Se exige que la granulometría del polvo de caucho proveniente del neumático fuera de uso se encuentre dentro de las bandas granulométricas propuestas en la NCh 3258-2012: “Mezcla asfáltica – Polvo de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso – Requisitos” (véase Tabla 2-1: Granulometría del polvo de caucho, NCh 3258-2012).

3.4 Mezcla asfáltica

3.4.1 Ensayos tradicionales

Las propiedades de las mezclas asfálticas se determinan en probetas confeccionadas según el método descrito en 8.302.40 del MC-V8, y la dosificación se realiza de acuerdo con lo indicado en 8.302.47 del mismo volumen del manual de carreteras.

Las exigencias para la mezcla utilizada como carpeta de rodadura son:

- Estabilidad > 9000 [N]
- $8 < \text{Fluencia (0,25 [mm])} < 16$
- $4 < \text{Huecos [\%]} < 6$

La exigencia de los vacíos del agregado mineral según el tamaño nominal de la granulometría de la mezcla de acuerdo con la Tabla 5.408.203.A, es la siguiente:

Tabla 3-7: Exigencias de vacíos en el agregado mineral, según Manual de Carreteras

Tamaño Nominal [mm]	Mínimo de Vacíos (VAM) [%]
25	13
20	14
12,5	15
10	16
5	18
2,5	21
1,25	23,5

3.4.2 Ensayo sensibilidad al agua

En el caso de la mezcla de asfalto con caucho, además se exige el ensayo de sensibilidad al agua, que mide el efecto de la acción del agua en la cohesión de una mezcla asfáltica.

La resistencia conservada de la mezcla se obtiene de comparar la tracción indirecta de un grupo de probetas acondicionadas en seco y un grupo de probetas acondicionadas en agua. Las normas a considerar son las europeas:

- I. UNE-EN 12697-23:2003 “Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas de mezcla bituminosa”. Se describe el procedimiento de ensaye para la determinación de la resistencia a la tracción indirecta.
- II. UNE-EN 12697-12:2006 “Determinación de la sensibilidad al agua de probetas de mezcla bituminosa”. Define las condiciones de compactación de las probetas y su acondicionamiento.

Para la realización de este ensaye se requiere la confección de 6 probetas Marshall, compactadas por impacto, con 50 golpes por cara. Estas probetas deberán tener densidades y longitudes medias dentro del rango; las probetas se separan en dos grupos.

Un conjunto se mantiene en seco a temperatura 20°C, mientras el otro se somete a una saturación en agua, previa aplicación de un vacío a 6.7 [kPa] durante 30 minutos, por un período de 68 a 72 horas. Luego ambos grupos se acondicionan a la temperatura de ensayo (15°C) por dos horas.

Una vez acondicionadas, se ensayan a la tracción indirecta, con el dispositivo Lottman, que permite cargar diametralmente la probeta.

La resistencia a la tracción indirecta (ITS) se calcula como:

$$ITS = \frac{2 * P}{\pi * D * H} \quad (1)$$

- 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 se debe calcular la resistencia conservada por tracción indirecta (ITSR), que es la razón entre el promedio de las resistencias medias de las probetas húmedas sobre las probetas en seco.

$$ITSR = \frac{ITS \text{ húmedas}}{ITS \text{ secas}} * 100 [\%] \quad (2)$$

Se exige que el valor de ITSR se mayor o igual a 85%. Se estima que, cumpliendo este estándar, la digestión del caucho en el asfalto ha sido exitosa, y en caso de cumplir con los parámetros de los ensayos tradicionales, se aprueba el uso de la mezcla en terreno.

3.4.3 Módulo de rigidez de la mezcla

Debido a que el asfalto se ve sometido constantemente a cargas cíclicas, se necesitan datos sobre la rigidez que tiene una mezcla, para conocer el comportamiento a esfuerzo-deformación del pavimento.

Al ser la mezcla asfáltica un material visco-elasto-plástico, se tienen deformaciones elásticas (resilientes) que tienen recuperación instantánea, conviviendo con una deformación permanente plástica y por fluencia viscosa.

En el método de diseño AASHTO 93, como requisito de entrada se pide el módulo del suelo sobre el que descansa la carpeta, el cual luego de una cierta cantidad de ciclos, tiene características resilientes. Sin embargo, el pavimento no responde de forma precisa a este modelo.

Para el asfalto, se utiliza el módulo dinámico, el cual representa de mejor forma el modelo viscoelástico de los materiales, obteniendo una magnitud del módulo complejo y un ángulo de fase, gracias a la estimulación a través de una onda sinusoidal de carga en el tiempo.

3.4.3.1 Módulo dinámico

El método más conocido para obtener el módulo dinámico es el descrito por la norma AASHTO TP62-03. En él se encontrará el módulo de rigidez “ $|E^*|$ ” y el ángulo de fase “ φ ” para un rango de temperaturas y frecuencias de carga.

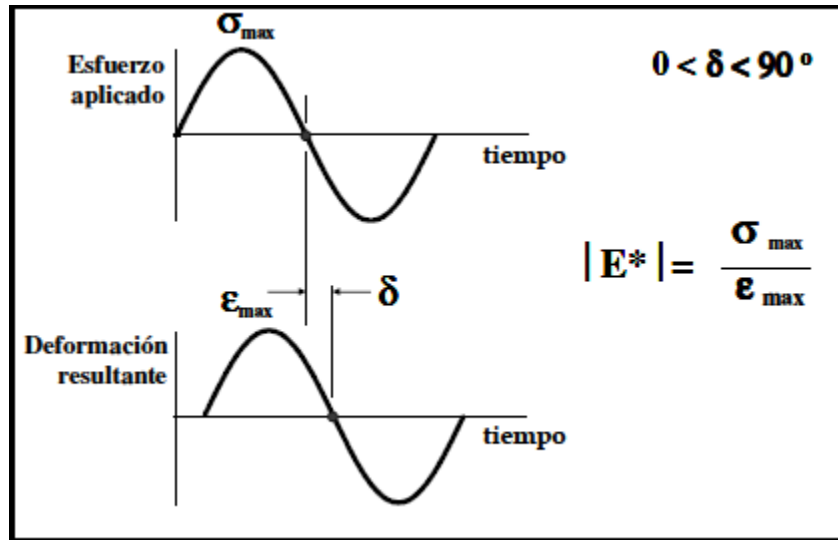


Figura 3-1: Esfuerzo aplicado y deformación aplicada en ensaye de módulo dinámico de la mezcla asfáltica

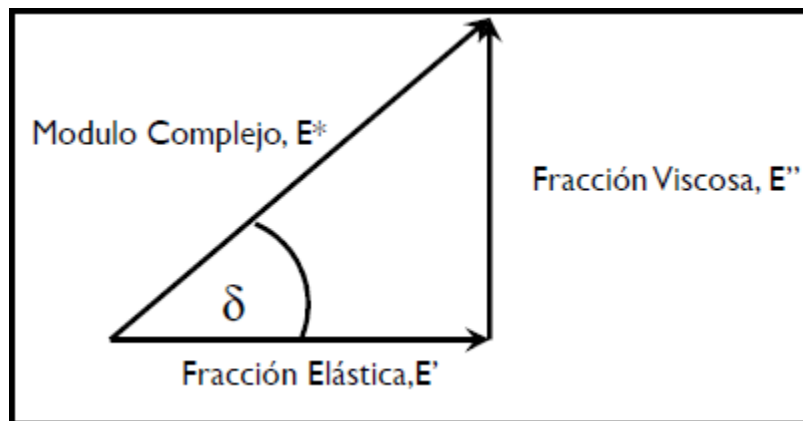


Figura 3-2: Ilustración del módulo complejo

Con la medición de E^* a diversas temperaturas y frecuencias, se puede obtener una curva maestra, la cual permite obtener el valor de E^* a cualquier temperatura y frecuencia de carga.

3.4.3.2 Módulo resiliente

Existe una aproximación al módulo de rigidez llamada módulo resiliente. Se tiene una carga repetida a modo de pulsos, con un período de descanso entre las aplicaciones de carga. Se basa en la idea de la existencia de una deformación permanente después de n ciclos, la cual se mantendría en el tiempo, provocando que el módulo de rigidez se mantenga constante.

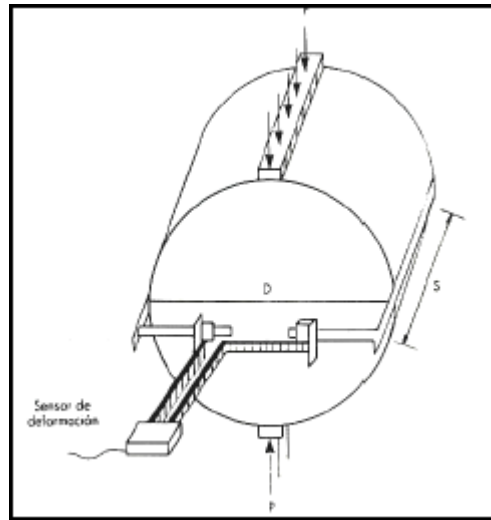


Figura 3-3: Disposición de carga en ensayo de módulo de rigidez

Para la ejecución de este ensayo, se ocupa la norma UNE-EN 12697-26, donde se carga la probeta en una dirección arbitraria de 0° , aplicando ciclos de carga y descarga; se aplica el mismo procedimiento cargando en una dirección a 90° (perpendicular a la anterior), usando dos temperaturas al ensayar: $15[^\circ\text{C}]$ y $25[^\circ\text{C}]$. Cabe señalar que este método entrega sólo información acerca del valor aproximado de la rigidez de la mezcla, pero no analiza el ángulo de fase, dejando a un lado la parte viscosa que tienen las mezclas asfálticas.

3.4.4 Ahuellamiento

Es un deterioro permanente producto de la deformación de corte en la carpeta asfáltica, sin cambios de volumen. Se manifiesta en una distorsión con forma de riel a través del camino, provocando un evidente riesgo para la conducción.

Existen diversos métodos de ensaye, entre los que se encuentran: ensayos de ruedas de carga, de corte simple, compresión confinada y compresión no confinada.

Dentro de los ensayos de ruedas de carga, se encuentran:

- Asphalt Pavement Analyzer (APA).
- Purdue Wheel Tracker (PurWheel).
- LCPC Wheel Tracker (LCPC).
- Mobile Load Simulator (MLS).
- Rueda de Hamburgo (HWT).

Siendo ésta última utilizada en el presente estudio.



Figura 3-4: Rueda de Hamburgo

El ensayo de ahuellamiento realizado a través del equipo HWT, tiene como procedimiento a seguir el descrito en la norma americana AASHTO T324-14: “Hamburg Wheel Track of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA)”. El equipo cuenta de dos ruedas de acero con carga aplicada equivalente a 705 [N], que se desplazan en dirección longitudinal, a una frecuencia de 52 [pasadas/minuto].

Se opta por utilizar el método de ensaye bajo agua a 50 [°C], que genera una condición extrema de mayor desgaste para la mezcla. Se utiliza mezcla compactada en compactador giratorio, de diámetro 150 [mm] y espesor de 60 [mm]. Luego se divide en dos para generar un “8”, el cual es ensayado. El objetivo es alcanzar las 20000 pasadas de la rueda o alcanzar una profundidad de huella de 20 [mm], esto se supervisa electrónicamente con el programa computacional incorporado en el equipo.

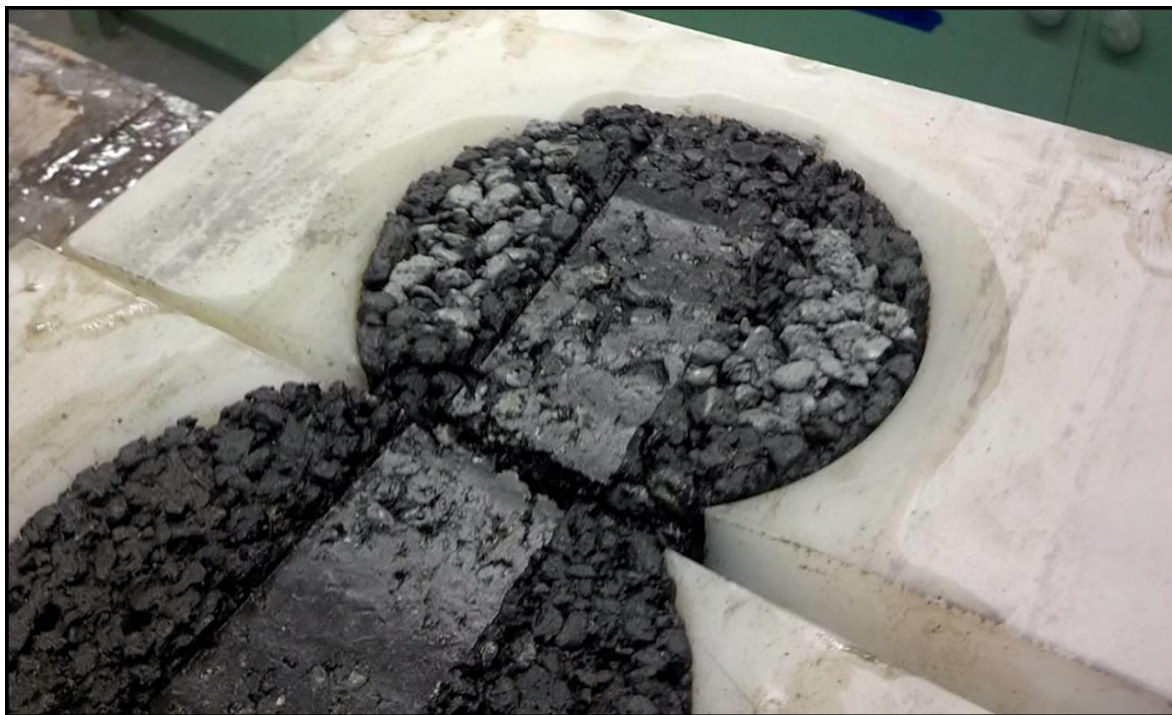


Figura 3-5: Probeta de ahuellamiento post ensayo

El uso de agua en el ensaye tiene como objetivo no sólo caracterizar la deformación producto de la rueda, sino que incluye la susceptibilidad a la humedad que presenta la mezcla. La resistencia a la deformación plástica se observa en la profundidad del ahuellamiento, mientras que el “Stripping Inflection Point” en general nos entrega el punto donde comienza el desprendimiento árido-agregado, que nos indica donde la humedad comienza a penetrar en la mezcla.

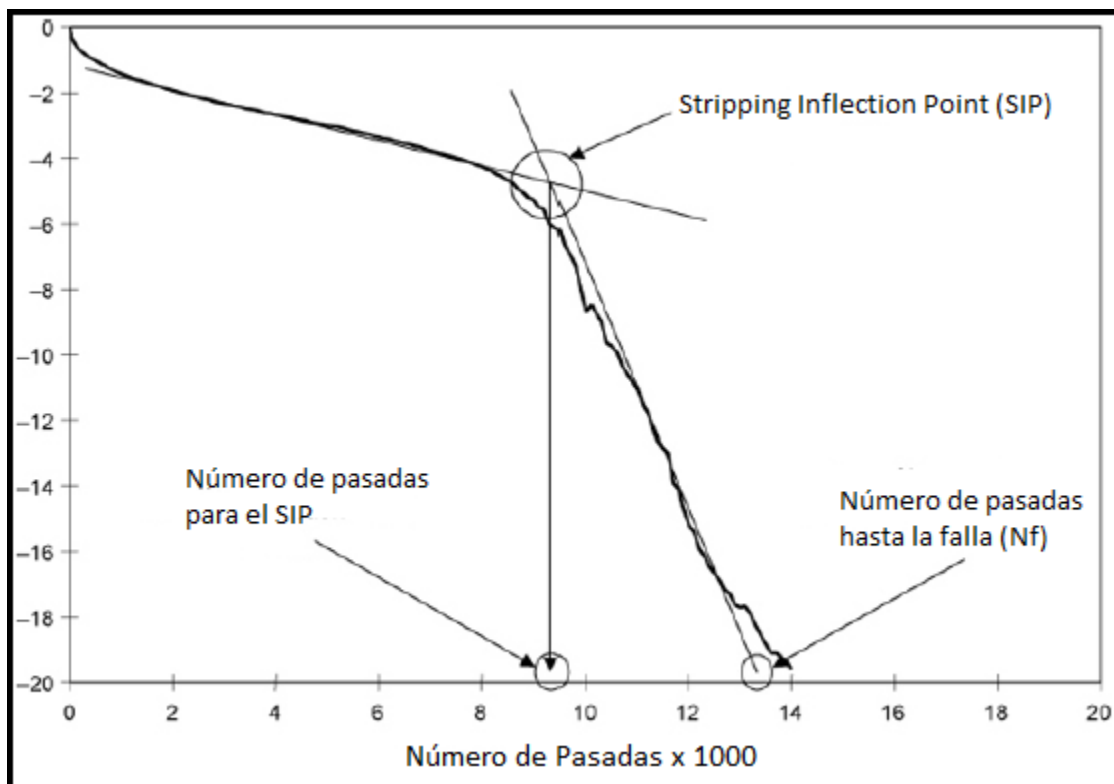


Figura 3-6: Gráfico cualitativo de ensaye de ahuellamiento por rueda de Hamburgo

El punto de inflexión se calcula como:

$$Pto. Inflexión (SIP) = \frac{Intercepto (segunda porción) - Intercepto (primera porción)}{Pendiente (primera porción) - Pendiente (segunda porción)}$$

3.4.5 Fatiga

La fatiga es uno de los deterioros críticos de los pavimentos flexibles. El caso típico comienza con una grieta provocada en el fondo del pavimento, por la deformación por tracción en el inicio de la carpeta; en caso de que la grieta sea visible, significa que todo el espesor se encuentra agrietado. Últimamente se han observado grietas que comienzan en la superficie, producto de los esfuerzos de tracción debido a la interacción de la rueda con el pavimento.

Los ensayos más comunes para caracterizar esta falla son:

- Viga simplemente apoyada: proveniente de Estados Unidos.
- Viga empotrada: proveniente de Francia.
- Compresión diametral: proveniente de Reino Unido.

Siendo la viga simplemente apoyada la ocupada en este estudio.

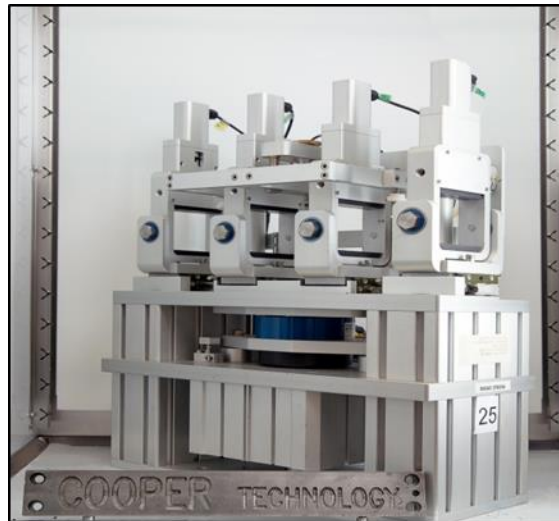


Figura 3-7: Equipo viga de cuatro puntos, para análisis de fatiga

Existen dos métodos de carga: se reconoce como carga dinámica una onda sinusoidal constante en el tiempo; mientras que la carga repetida es un pulso de carga que se intercala con un período de descanso entre aplicaciones de carga.

En el Laboratorio Nacional de Vialidad se encuentra disponible el ensayo de fatiga con viga de cuatro puntos, el cual presenta un método para caracterizar las mezclas sometidas a carga sinusoidal de fatiga por flexión en cuatro puntos de una viga prismática, de 380 [mm] de largo, 63 [mm] de ancho y 50 [mm] de altura.

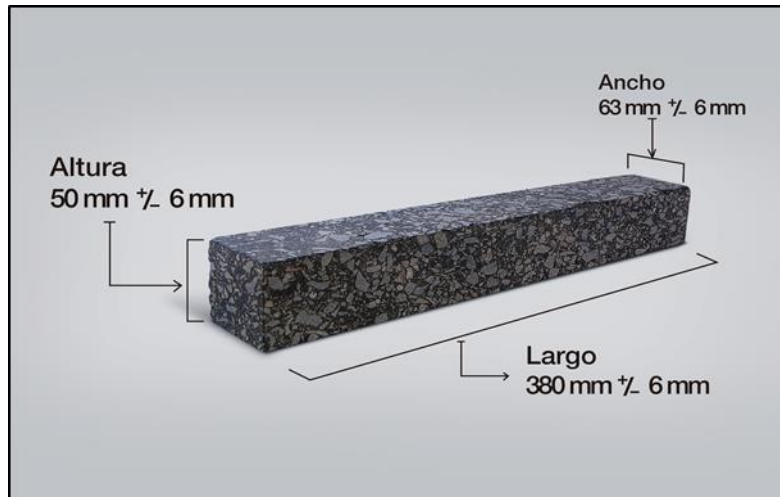


Figura 3-8: Longitudes de probeta prismática para ensayo de fatiga

Se aplica una frecuencia de carga (10 [Hz]), una deformación constante, la temperatura (gracias a una cámara termostática) a 20 [°C], declarándose la falla al llegar a una pérdida de rigidez inicial de un 50%. Para la aplicación de este ensayo se utiliza la norma AASHTO T 321-07: "Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending".

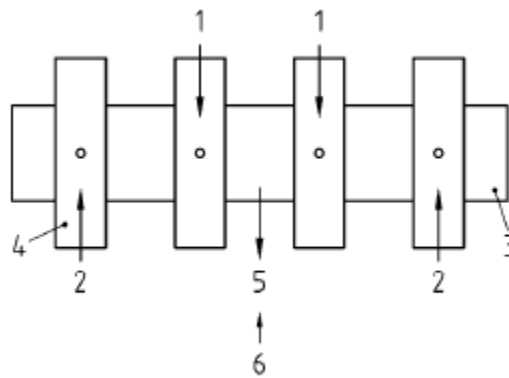


Figura 3-9: Vista lateral con puntos característicos de ensayo de fatiga

1. Carga aplicada.
2. Reacción.
3. Probeta.
4. Mordaza de la probeta.
5. Deflexión.
6. Retorno a la posición original.

La experiencia remite que un betún blando se desempeña mejor a fatiga por deformación constante que un betún rígido. Este dato es importante pues los pavimentos de asfalto con caucho se reconocen como más rígidos que el resto de los pavimentos.

Cabe destacar que existen modelos que correlacionan los valores de fatiga de los ensayos con las fallas presentadas por el pavimento en terreno, pero aún no existe una semejanza validada experimentalmente en nuestro país, debido a lo nuevo que es este ensayo en Chile [9].

En general, se reconocen las siguientes semejanzas y diferencias entre el ensaye versus la realidad del camino.

Tabla 3-8: Semejanzas ensaye de laboratorio con falla de fatiga en terreno

Parámetros	Semejanzas
	Terreno - Laboratorio
Escala	El material y los espesores son similares en ambos casos a nivel de carpeta de rodado
Solicitud	Formas y tiempos de acción son semejantes
Niveles de tensión y deformación	En ambos casos coinciden en orden de magnitud
Deformaciones por Flexión	El ensayo logra materializar la compresión superior y tracción inferior que se produce mediante la solicitud real de abajo hacia arriba.
Envejecimiento	Se puede simular el envejecimiento tanto a corto como a largo plazo en el laboratorio.

Tabla 3-9: Diferencias entre ensaye de laboratorio y falla de fatiga en terreno

Parámetros	Diferencias	
	Terreno	Laboratorio
Temperatura	Variable	Constante
Régimen de Solicitación	Discontinua, permitiendo “healing”	Continua
Condición de apoyo	Placa completamente apoyada en la base	Sujeta sólo en los apoyos
Simetría de la carga	Simetría axial, si es cuadrada o elíptica 3D, si es circular 2D	Simetría con respecto a planos verticales longitudinales
Efecto del agua	Presente	Ausente
Condición de Carga	Las cargas solicitantes son dadas y de naturaleza aleatoria	Está la posibilidad de ensayo por carga controlada, pero de tipo monótono. El modo de ensayo por deformación controlada no existe en el caso real.

3.5 Controles de terreno

Para la correcta evaluación de los pavimentos, se hace menester analizar los pavimentos terminados en terreno, tanto por la inspección visual de expertos como a través de auscultación con equipos (electrónicos y mecánicos).

Como primera medida, la inspección visual es necesaria, pues permite corregir a tiempo cualquier problema que se pueda desarrollar durante la puesta en terreno; no obstante, si se requiere más información, se procede a auscultar.

En este caso, se procede a medir las deflexiones, la regularidad del camino y el ahuellamiento.

3.5.1 Medición de deflexiones

La deflexión es el desplazamiento vertical que tiene el asfalto al aplicarse una carga. Este valor depende de la temperatura, la rigidez, el espesor del pavimento, además del soporte de la fundación.

Esta característica se obtiene a través del Deflectometría de Impacto (FWD), ensaye no destructivo que permite evaluar in situ la capacidad de soporte del pavimento. La fuerza aplicada se produce dejando caer masas paralelas desde diferentes alturas sobre la superficie del camino, variando altura de la caída y las masas se crean impulsos desde los 12 [kN] hasta los 156 [kN] (habitualmente se usan cargas de hasta 50 [kN] que corresponde a simular un eje de 10 [Toneladas]).

Los resultados se captan a través de una serie de sensores llamados sismómetros con una resolución de 1 [micrómetro], a diferentes distancias de captación (0, 20, 30, 45, 60, 90 y 120 [cm]), obteniendo una serie de datos de deflexiones.

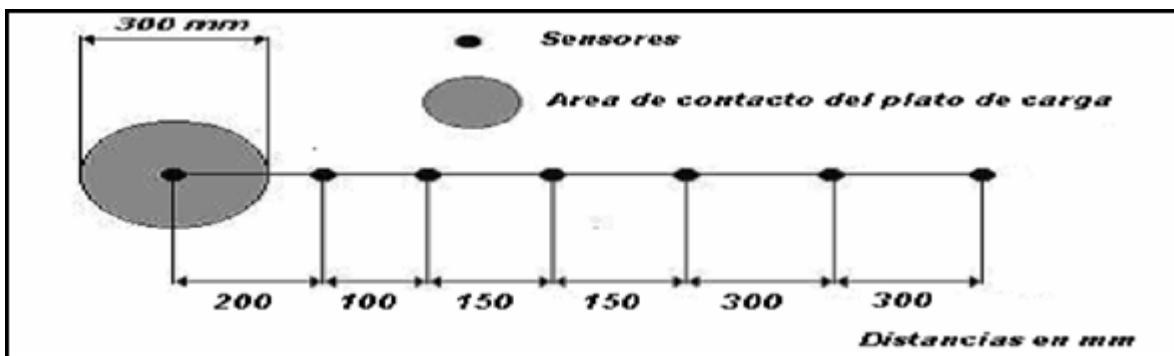


Figura 3-10: Localización típica de los sensores del Deflectómetro de impacto con respecto al plato de carga



Figura 3-11: Deflectómetro de impacto KUAB, perteneciente al LNV

3.5.2 Índice de regularidad superficial (IRI)

La regularidad (también llamada rugosidad) se define como las variaciones de altura en el camino, el cual provoca en los vehículos la activación del sistema de suspensión. Está íntimamente ligada a la comodidad de la capa de rodadura, puesto que es la característica más notoria para los conductores. En general los sistemas de medición calculan directamente estos sobresaltos en el camino y entregan una cantidad de m/km de irregularidad, que corresponde al movimiento vertical acumulado dividido una distancia recorrida.

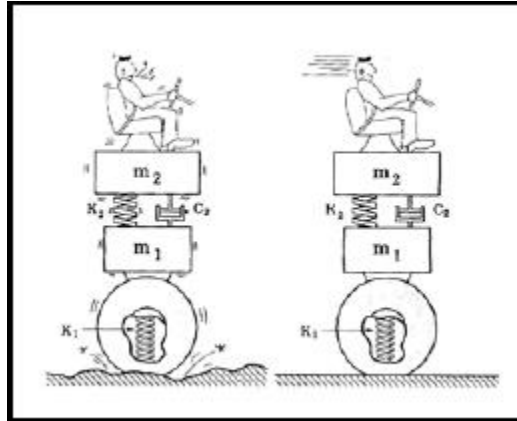


Figura 3-12: Bosquejo de camino con IRI deficiente y camino con IRI óptimo.

Analíticamente se tiene la siguiente expresión:

$$IRI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_{si} - S_{ui}| \quad (3)$$

- n: número de muestras del perfil.
- S: desplazamiento de la masa.
- L: longitud del perfil.
- v: velocidad de simulación.

Las mediciones se realizan con el perfilómetro laser ARAN y el perfilómetro laser multipropósito MLP, del LNV. La evaluación del IRI se describe en el Manual de Carreteras 5.408.304(5).

- Perfilómetro Laser ARAN (automatic road analyzer): es un vehículo especializado en la recopilación de datos; el equipo principal es el computador de adquisición de datos central, que recolecta, organiza y almacena la información recogida. Cuenta con un sistema láser para la medición de IRI, macrotextura y ahuellamiento.
- Perfilómetro Laser Multipropósito MLP: es un sistema equipado con un sistema láser, un sistema GPS y un sistema de video digital. Además del IRI, permite obtener la macrotextura, ahuellamiento, escalonamiento y cotas relativas del pavimento.

3.5.3 Resistencia al deslizamiento

Una de las características primordiales que debe tener un pavimento es la resistencia al deslizamiento, tanto para asegurar el correcto frenado y evitar el derrape en zonas de curvas.

La adherencia pavimento-neumático va disminuyendo con el tiempo debido al pulimiento de la superficie de rodado debido al tránsito. Es en ese sentido que uno de los parámetros más relevantes asociados al deslizamiento es el coeficiente de roce, el cual cuantifica la fuerza de fricción desarrollada por el pavimento. Se reconoce también la importancia de la condición de humedad que posee la superficie en el momento de transitar, ya que un pavimento húmedo tiene menor capacidad de adherencia que un pavimento seco; por ésta última razón se requiere ensayar para la peor condición – pavimento mojado –.

La resistencia al deslizamiento es la fuerza provocada por el roce entre el neumático y el pavimento, tal como:

$$Fr = \mu * N \quad (4)$$

Siendo:

Fr: fuerza de roce

μ : coeficiente de roce

N: fuerza normal de la rueda.

En este sentido, se tienen dos componentes importantes, el coeficiente de roce longitudinal y el coeficiente de roce transversal.

3.5.3.1 Coeficiente de roce longitudinal

En el caso del roce longitudinal, su estudio es necesario dado que mide la capacidad que tiene un vehículo para ejercer un frenado longitudinal en caso de emergencia.

Los equipos más comúnmente utilizados para medir este tipo de fricción son el tráiler ASTM y el GRIPTESTER.

3.5.3.2 Coeficiente de roce transversal

En el caso del roce transversal, su estudio es importante ya que caracteriza la fuerza de reacción transversal que tiene una rueda al enfrentar una curva, por lo tanto, evitar el derrape.

En este caso, los equipos más utilizados para su medición son el SCRIM y el MuMeter, ambos de origen británico.

En general, el coeficiente de roce se mide con el SCRIM perteneciente a la LNV, el cual permite evaluar la adherencia de modo continuo: a 50 [km/h] de velocidad, con una capa de 0,5[mm] de agua gracias a la cisterna incorporada de 5000 [litros] de capacidad. La rueda de medición posee una masa de 200 [kg], con un neumático liso dispuesto en un ángulo de 20° a la trayectoria del camión.

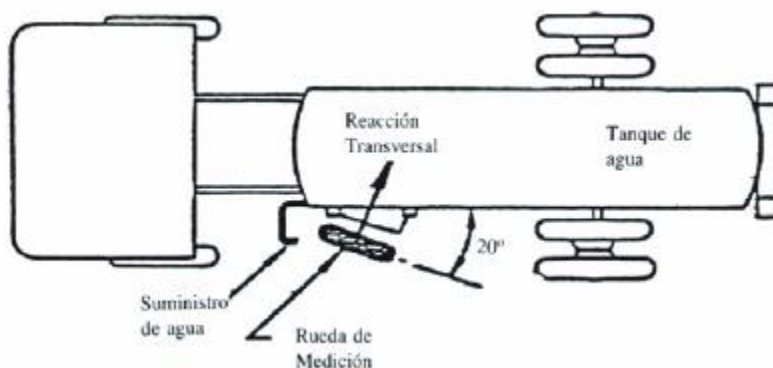


Figura 3-13: Bosquejo en planta del equipo SCRIM

La evaluación se realiza de acuerdo con el procedimiento descrito en 5.408.303 (3) del Manual de Carreteras, el cual exige:

Tabla 3-10: Exigencia IRI Manual de Carreteras

	Coeficiente de Fricción
Tramos con singularidades	Mínimo 0.55
Tramos sin singularidades	Mínimo 0.4

4. Seguimiento tramos de prueba

En el marco del contrato: “Reposición Ruta E-46, sector Catapilco – La Laguna, Provincia de Petorca, Región de Valparaíso, DM. 240 – DM. 12.220”, se incluye la realización de tres tramos de prueba de 500 metros de largo, donde se aplican tres tipos diferentes de asfalto modificado:

- I. DM. 300 – DM. 800: Asfalto modificado con polvo de caucho mediante vía seca, proveniente de neumáticos fuera de uso (NFU).
- II. DM. 800 – DM 1.300: Asfalto multigrado.
- III. DM. 1.300 – DM. 1.810: Asfalto modificado con polímeros.

En todos los tramos el espesor de la carpeta es de 5 [cm], sobre un Binder de 6 [cm], mientras que el ancho de la calzada y las bermas es de 10 [m].

Personalmente se realizan los puntos: 4.3 Caracterización de los agregados (dejando la caracterización del asfalto al área de química del LNV), 4.4 Diseño de mezcla de Asfalto Caucho y visaciones de Asfalto Multigrado y Asfalto Modificado con Polímeros, 4.5 Ensayes de comportamiento mecánico. La sección 4.6 de ensayos en terreno la realizó la unidad especializada de Auscultaciones del LNV

4.1 Ubicación

El proyecto se encuentra en la provincia de Petorca, comuna de Catapilco, conectando Catapilco con La Laguna.

Con un largo de 11.980 [m], el inicio del proyecto se encuentra ubicado en el empalme con el enlace existente al acceso a Catapilco por la Ruta 5 norte, km 140.



Figura 4-1: Ubicación geográfica del proyecto

4.2 Características

El proyecto contempla obras de pavimentación en dos capas: binder 60 [mm] y carpeta de 50 [mm], sobre una base granular de CBR > 80%, de 160 [mm].

La velocidad de diseño desde el DM. 240 hasta el DM. 10.000 (incluyendo el tramo de prueba) es de 100 [km/h], y entre el DM. 10.000 – DM. 12.220 se tiene una velocidad de 80 [km/h].

En todo el proyecto, la calzada es de 7 [m] de ancho con un bombeo del 2%. La berma revestida es de 1,5 [m] con un sobre ancho de plataforma de 0,5 [m].

4.3 Caracterización de los materiales

Se realiza la caracterización de los materiales por separado, antes de diseñar la mezcla asfáltica, para establecer parámetros mínimos de comportamiento.

Se debe tener presente, que debido a que la planta continua con que se trabajó en terreno no tenía la capacidad de incorporar caucho por vía seca, se tuvo que buscar una planta cercana que pudiera ingresarlo. Previamente se intenta usar un método alternativo para continuar utilizando la planta continua, pero el ensayo de sensibilidad al agua en laboratorio no entrega resultados satisfactorios (véase

Anexo B: Resultados de ensayos para asfalto modificado con caucho, usando un método propuesto para utilizar planta). Ante esto se toma la decisión de usar asfalto con caucho producido en una planta discontinua de Con Con, la cual permite el ingreso de caucho por vía seca; dado este motivo, el árido usado en esta mezcla en particular cambia; no obstante, se procura que tenga las propiedades similares al árido ocupado para los tramos de asfalto modificado con polímero y asfalto multigrado, como se puede analizar más adelante.

4.3.1 Plantas de asfalto

Las plantas de producción de asfalto se pueden clasificar de dos maneras: por la facilidad de transportarse e instalarse (plantas portátiles o estacionarias) y por la forma de producir la mezcla (plantas de producción continua y producción discontinua). Para este último caso, se tuvo que analizar la pertinencia de usar una planta que pueda incorporar caucho reciclado.

4.3.1.1 Plantas de producción continua

El proceso de elaboración a través de este sistema se define por los siguientes pasos: dosificación de agregados, homogeneización, secado, inyección de asfalto, mezclado, elevación, almacenamiento y carga del camión. Estos pasos se cumplen de manera lineal, por lo cual recibe el nombre de continua.

En el caso de la planta usada en Catapilco, el proceso de secado se realiza a fuego directo, por lo cual se hace imposible agregar polvo de caucho antes del mezclado.



Figura 4-2: Diagrama de proceso de una planta continua

4.3.1.2 Plantas de producción discontinua

En este proceso, los agregados son alimentados en cantidades controladas, luego pasados por un tambor en donde se secan y calientan, para después pasar por un cribado, separando los diferentes tamaños; posteriormente los áridos y los aditivos son pesados, unidos con el asfalto y mezclados en su totalidad para formar la mezcla, para su transporte hacia el lugar de pavimentación.

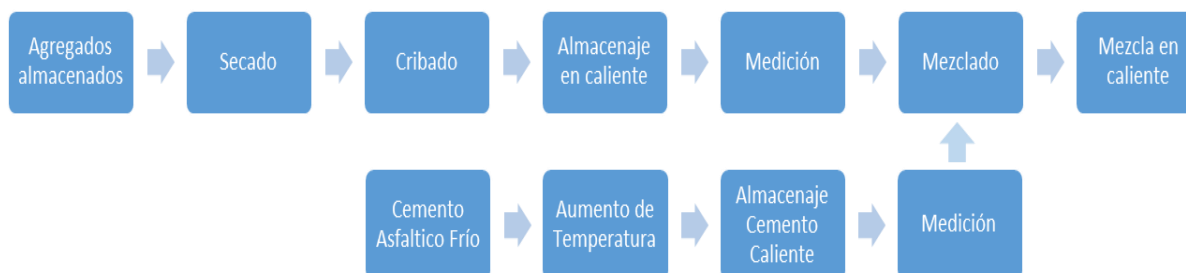


Figura 4-3: Diagrama de procesos de una planta discontinua

Se debe destacar que las plantas asfálticas discontinuas aumentan la temperatura de los áridos a través de un tambor caliente, por ende, se puede agregar el polvo de caucho antes del mezclado, así como también RAP.

4.3.2 Agregados

Como se explicó anteriormente, se usan dos tipos de agregados, desde ahora llamados Áridos Catapilco y Árido Con Con. Para la caracterización de ambos se utilizan los ensayos exigidos en 5.408.2 del Volumen 5 del Manual de Carreteras.

4.3.2.1 *Granulometría*

Como requisito de los áridos combinados, se determina la granulometría de la mezcla, la cual debe considerarse dentro de la especificada en el proyecto: Tipo semidensa IV-A-12, mostrada en la Tabla 5.408.201.F del M.C.-V.5.

- Áridos Catapilco

Tabla 4-1: Granulometría Áridos Catapilco

Granulometría Catapilco			Banda de Trabajo	
Malla	mm	% pasa	Banda Inferior	Banda Superior
3/4	20	100	100	100
1/2	12,5	87	81	91
3/8	10	71	68	78
nº4	5	50	48	58
nº8	1,5	33	31	39
nº30	0,63	12	12	18
nº50	0,315	7	6	12
nº100	0,16	5	4	8
nº200	0,08	2	2	6

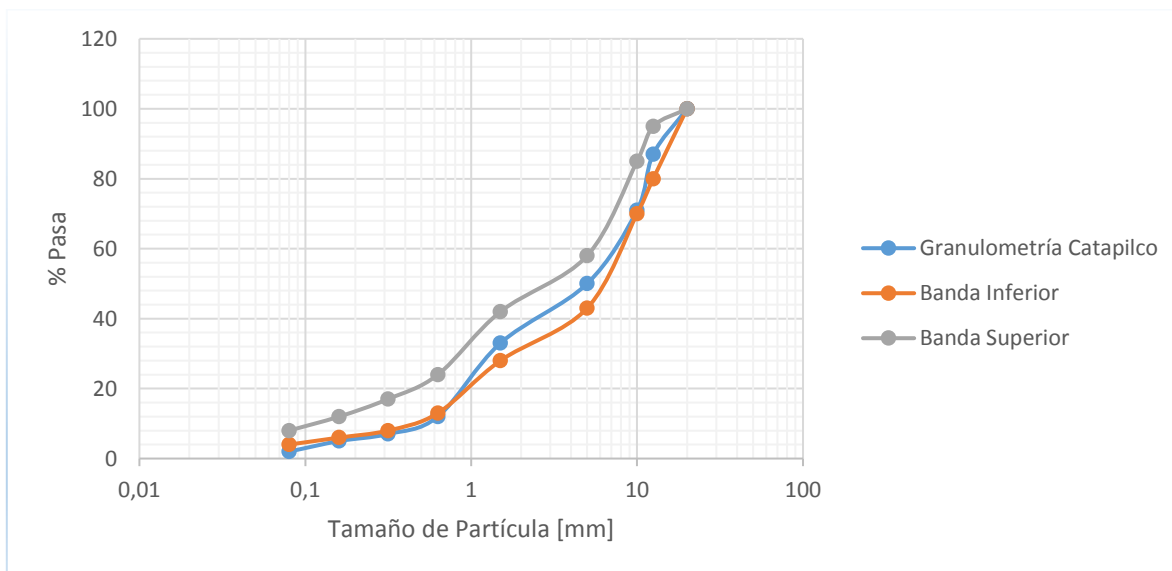


Figura 4-4: Granulometría Áridos Catapilco

- Áridos Con Con

Los áridos combinados deben cumplir con las especificaciones del tipo: granulometría semidensa IV-A-12, mostrada en la Tabla 5.408.201.F del M.C.-V.5.

Como la dotación de polvo de caucho es igual a 0,5% en peso de los áridos, no es necesario tenerla en cuenta para la elaboración de la curva granulométrica (como se especifica en 5.420.201(4) del M.C.-V.5).

Tabla 4-2: Granulometría áridos Con Con

Granulometría Bitumix			Banda de Trabajo	
Malla	mm	% pasa	Banda Inferior	Banda Superior
3/4	20	100	100	100
1/2	12,5	90	81	91
3/8	10	75	68	78
nº4	5	51	48	58
nº8	1,5	36	31	39
nº30	0,63	16	12	18
nº50	0,315	9	6	12
nº100	0,16	6	4	8
nº200	0,08	2	2	6

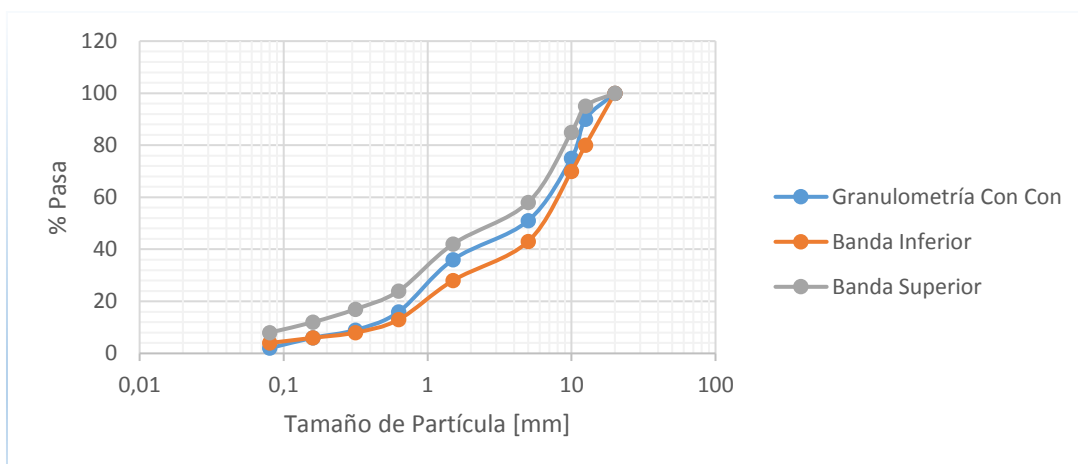


Figura 4-5: Granulometría Áridos Con Con

4.3.2.2 Determinación requisitos para fracción gruesa

Se analizan los áridos en base a las exigencias descritas en la tabla 5.408.201.B del M.C.-V.5, la cual pide lo siguiente:

Tabla 4-3: Características fracción gruesa áridos Catapilco

Ensayo	Laboratorio	Exigencia
Partículas Lajeadas	4.4%	< 10%
Partículas Chancadas	96,1%	> 90%
Desgaste de Los Angeles	10,1%	< 25%
Adh. Método Estático	99%	> 95%

Tabla 4-4: Características fracción gruesa áridos Con Con

Ensayo	Laboratorio	Exigencia
Partículas Lajeadas	3,3%	< 10%
Partículas Chancadas	97,2%	> 90%
Desgaste de Los Angeles	9,2%	< 25%
Adh. Método Estático	99%	> 95%

Para ambos áridos se cumple con los requerimientos pedidos.

4.3.2.3 Determinación requisitos para fracción fina

Se analizan los áridos para los requisitos exigidos en la tabla 5.408.201.B del M.C.-V.5.

Tabla 4-5: Características fracción fina áridos Catapilco

Ensayo	Laboratorio	Exigencia
Adherencia Riedel-Weber	4-9	Mín 0-5
Índice de Plasticidad	NP	NP

Tabla 4-6: Características fracción fina áridos Con Con

Ensayo	Laboratorio	Exigencia
Adherencia Riedel-Weber	4-9	Mín 0-5
Índice de Plasticidad	NP	NP

En ambos casos se cumple satisfactoriamente la exigencia del manual de carreteras.

4.3.3 Cemento asfáltico

En la Tabla 5.408.202.A del M.C.-V.5 se encuentran las especificaciones que debe cumplir el asfalto modificado con polímeros.

Tabla 4-7: Características cemento asfáltico modificado con polímeros

Ensaye	Laboratorio	Exigencia
Penetración 25°C, 100 g, 5 s, [0,1mm]	80	60-80
P. de ablandamiento [°C]	73	Informar
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, [cm]	116	Mínimo 80
Ductilidad a 5°C, 5 cm/min, [cm]	66	Mínimo 50
Recuperación Elástica a 13°C, 20 cm, 1 h [%]	76	Mínimo 50
Recuperación Elástica por Torsión [%]	78	Informar
Índice de Penetración	+5,0	Mínimo +2

En la Tabla 5.408.202.B se encuentran las especificaciones que debe cumplir el asfalto multigrado.

Tabla 4-8: Características cemento asfáltico multigrado

Ensaye	Laboratorio	Exigencia
Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s [0,1mm]	74	60-80
Punto de ablandamiento [°C]	65	Mínimo 52
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, [cm]	134	Mínimo 80
Índice de Fraass [°C]	-11	Máximo -17
Viscosidad Brookfiels a 60°C [Poise]	5000	5000-11000
Índice de Penetración	+3,1	Mínimo +0,3
Después de PDR		
Pérdida por Calentamiento [%]	0,1	Máximo 1,0
Viscosidad Brookfield a 60°C [Poise]	22600	Informar
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, [%]	68	Mínimo 54

Para asfalto modificado con polvo de caucho, se analiza el asfalto tradicional con el cual se confecciona la mezcla, debiendo cumplir con la especificación descrita en 8.301.1A del M.C.-V.8.

Tabla 4-9: Características cemento asfáltico tradicional usado en asfalto con caucho

Ensayo	Laboratorio	Exigencia
Penetración a 25°C [0,1 mm]	59	Mínimo 40
Viscosidad rotacional a 60°C [Poises]	3210	> 2400
Viscosidad rotacional a 135°C [Poises]	5,6	Informar
Ensaye de la mancha [% xilol]	< 30	Máximo 30
Ductilidad 25°C, 5 cm/min, [cm]	> 150	Mínimo 100
Punto de ablandamiento [°C]	51	Informar
Índice de Pfeiffer	-0,4	-2,0 a +1
PDR		
Pérdida por Calentamiento [%]	0,5	Máximo 0,8
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, [0,1 mm]	34	Informar
Punto de ablandamiento [°C]	58	Informar
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, [cm]	> 150	Mínimo 100
Viscosidad rotacional a 60°C [P]	11100	Informar
Índice de Durabilidad	2,1	Máximo 3,5

4.3.4 Caucho

El polvo de caucho triturado debe cumplir las exigencias de la norma NCh 3258, Mezcla asfáltica – Polvo de caucho proveniente de los neumáticos fuera de uso – Requisitos.

Al momento de entrega en faena, los requisitos físicos que se deben cumplir son los siguientes.

Tabla 4-10: Características del polvo de caucho

Ensayo	Norma	Laboratorio	Exigencia
Densidad Relativa	UNE 53526	1,15	1,15 ± 0,05
Contenido de Humedad	NCh 1515	0,05%	< 0,75%
Contenido Ferromagnético	5.420.203(3) del M.C.	0,003%	Peso < 0,01%
Contenido Textil	5.420.203(3) del M.C.	0,02%	Peso < 0,05%
Impurezas	5.420.203(3) del M.C.	0,03%	Peso < 0,25%

La granulometría del polvo se encuentra dentro de la banda especificada como P-2, la cual se ubica en la tabla 5.420.203.B del Manual de Carreteras Volumen 5.

Tabla 4-11: Granulometría polvo de caucho

Granulometría Polvo Caucho		Banda P-2	
mm	% pasa	Banda Inferior	Banda Superior
1,25	100	100	100
0,63	57	40	100
0,315	31	10	70
0,16	4	2	40
0,08	2	0	20

4.4 Diseño mezcla asfáltica

Para trabajar en laboratorio con las mezclas modificadas con polímero como con asfalto multigrado se reproducen las mezclas diseñadas por el Autocontrol con el método Marshall descrito en 8.302.47 del M.C.-V.8. Para la mezcla de asfalto con caucho, por tratarse de un método nuevo, se utiliza la dosificación realizada en el LNV.

4.4.1 Visación mezcla de asfalto multigrado

Con la dosificación de la mezcla presentada por la Empresa, se reproduce la mezcla en laboratorio para su visación, identificando que los parámetros se encuentren dentro de los límites establecidos en el Manual de Carreteras: asfalto óptimo, granulometría de diseño, temperaturas de mezclado y compactación, porcentaje de vacíos y vacíos en el agregado mineral.

Tabla 4-12: Visación de parámetros Marshall mezcla de asfalto multigrado

Parámetros Marshall	Visación LNV	Exigencia
Contenido Óptimo de Asfalto	5,5	-
Densidad Máxima de la Mezcla	2475	-
Densidad Marshall	2333	Densidad Diseño ± 20 [Kg/m ³]
Estabilidad	11756	> 9000 [N]
Fluidez	16	8 – 16 [0,25 mm]
Vacíos en la Mezcla	5,7	4 – 6 [%]
Vacíos en el Agregado Mineral	17,5	> 14 [%]

Por tanto, la dosificación presentada se considera apta para su utilización.

4.4.2 Visación mezcla de asfalto con modificado con polímeros

Se realiza el mismo proceso anterior. Para el uso de la mezcla modificada con polímeros, se visa en el LNV para comprobar que los parámetros de la mezcla cumplan con la normativa del Manual de Carreteras.

Tabla 4-13: Visación de parámetros Marshall mezcla modificada con polímeros

Parámetros Marshall	Visación LNV	Exigencia
Contenido Óptimo de Asfalto	5,5	-
Densidad Máxima de la Mezcla	2480	-
Densidad Marshall	2335	Densidad Diseño ± 20 [Kg/m ³]
Estabilidad	11473	> 9000 [N]
Fluidez	16	8 – 16 [0,25 mm]
Vacíos en la Mezcla	5,8	4 – 6 [%]
Vacíos en el Agregado Mineral	17,5	> 14 [%]

Verificándose el control de calidad, la mezcla es aprobada para su utilización en el tramo de prueba.

4.4.3 Diseño mezcla asfalto con caucho por vía seca

Se realiza el diseño de la mezcla siguiendo las directrices expresadas en la sección 5.420: Mezclas Asfálticas en Caliente Modificadas con Polvo de Caucho, del Volumen 5 del Manual de Carreteras.

En general, se busca que un asfalto del tipo tradicional (CA-24) mejore sus propiedades, a través de la modificación de sus características reológicas mediante la adición de polvo de caucho por vía seca, lo cual conlleva a una manera de dosificar distinta a la dosificación Marshall tradicional.

Tomando como base las experiencias de estudios anteriores realizados en el LNV, se recomienda partir usando el porcentaje de asfalto de la dosificación de una mezcla tradicional como patrón, e ir aumentando la cantidad de asfalto.

4.4.3.1 Dosificación asfalto con caucho

Una vez realizados los ensayos de caracterización del asfalto y el agregado, se procede a aplicar los siguientes ensayos:

- I. Se establece el porcentaje de caucho y asfalto a utilizar, esto a través del ensayo de Sensibilidad al agua (tracción indirecta tras inmersión) a temperatura de ensaye de 15°C, según Norma UNE-EN 12697-12, complementada con la norma UNE-EN 12697-23. Con el cual se va probando desde un porcentaje de asfalto igual al usado en la mezcla patrón (tradicional), para luego ir sumando 0,1% de asfalto, hasta lograr aprobar el ensayo.
- II. Luego de aceptada la mezcla tras el ensaye de sensibilidad al agua, se procede a analizar los parámetros Marshall utilizados en dicha mezcla, exigiendo que se cumpla con las tablas 5.408.203.A y 5.408.203.B del M.C.-V.5.

El asfalto con caucho modificado por vía seca se debe dosificar de la siguiente manera (se aplica el procedimiento usado en las investigaciones anteriores del LNV [7] [10]):

- a) Calentar agregados en horno a temperatura de mezclado (170 °C), el asfalto a la misma temperatura, y pesar la cantidad de caucho a usar.
- b) Mezclar los agregados calientes con la cantidad de caucho que corresponda (0,5% peso del agregado) y colocarlos en horno a la temperatura de digestión por 5 minutos, provocando el aumento de temperatura del caucho.
- c) Agregar a la mezcla de agregados con caucho, el asfalto caliente, y mezclar vigorosamente hasta que los áridos queden embebidos de asfalto.
- d) Colocar la mezcla asfáltica en horno, durante el tiempo fijado para el proceso de digestión (90 minutos) a la temperatura de mezclado.
- e) Luego se retira la mezcla del horno y se remueve el material, para proceder a compactar en moldes a una temperatura 10°C menor a la temperatura de mezclado (160°C). El tipo de compactación depende del ensayo para el que posteriormente se utilizarán las probetas.
- f) Se removerá la probeta del molde una vez que haya alcanzado la temperatura ambiente.

4.4.3.2 Determinación de la digestión del caucho con el asfalto

El asfalto con el caucho necesitan de un tiempo de reacción en que ambos modifiquen sus propiedades y trabajen como una sola mezcla, para ello se especifica el tiempo de digestión. Se especifica una granulometría del caucho del tipo P-2, que según estudios anteriores del LNV [11], asegura un correcto proceso de digestión.

En estudios anteriores del LNV [10], el asfalto con el caucho debía tener un tiempo de digestión de dos horas para asegurar su calidad. En este trabajo con el tipo de áridos y tipo de asfalto usado, el ensayo de sensibilidad al agua cumple con lo especificado a los 90 minutos, lo que indica que se pudo disminuir el tiempo de digestión. Para 60 minutos, no se cumple el valor de ITSr exigido según Tabla 5.420.302.A del M.C.-V.5. Se utilizan tres probetas para cada valor de ITS, presentándose el promedio de acuerdo con la norma, con su desviación estándar presentada en el cuadro.

En terreno se controla que, como mínimo, exista una digestión de 90 minutos, controlándose una temperatura de 160[°C] al momento de compactar.

Tabla 4-14: Estudio del tiempo de digestión para el asfalto con caucho

% Asfalto	% Caucho	Tiempo Digestión [h]	ITS Húmedo [GPa]	D. Est. [GPa]	ITS Seco [GPa]	D. Est. [GPa]	ITSr [%]	Exigencia ITSr [%]
5,5	0,5	1	1029,4	70,8	1442,6	40,5	71,4	85
5,5	0,5	1,5	1573,4	89,4	1696,2	153,0	92,8	85

4.4.3.3 Fórmula de trabajo

Finalmente, se realizan mezclas con distintos porcentajes de asfaltos alrededor del 5,5 %, para comprobar si se puede aplicar en terreno la tolerancia de una mezcla en caliente para rodadura correspondiente a $\pm 0,3$ % del óptimo de asfalto.

Tabla 4-15: Dosificación de asfalto con caucho

Contenido Asfalto	5,2%	5,3%	5,4%	5,5%	5,6%	5,7%	5,8%
ITSr	89,0%	91,6%	90,1%	91,4%	98,6%	100%	100%
Estabilidad	13908	13444	13511	12911	12636	13675	13984
Fluidez	15	15	15	16	15	19	16

Para esta dosificación, se considera aceptable la tolerancia usada en terreno, aceptando el óptimo de asfalto de $5,5 \pm 0,3$ % de asfalto con respecto al agregado.

4.5 Ensayos de comportamiento mecánico

Para determinar el desempeño de las mezclas, se utilizan los siguientes ensayos para establecer comportamientos a futuro.

4.5.1 Rigidez a través del método de módulo resiliente

La caracterización de la rigidez se estima a través del ensayo de tracción indirecta según la norma UNE-EN 12697-26: Rigidez, Anexo C, con compactación tipo Marshall.

Se obtienen resultados de rigidez para 15 °C y 25 °C. Se debe considerar que este ensaye no entrega el ángulo de fase ni tampoco considera el efecto del tiempo de carga, por lo cual no representa de manera fiel la rigidez de una mezcla asfáltica; no obstante, proporciona un valor de rigidez para comparar mezclas.

En el proceso de extracción y reproducción de asfalto se aplica la norma ASTM D3202, la cual estandariza dos procedimientos de extracción de asfalto: mezcla asfáltica replicada en laboratorio sin la aplicación de un procedimiento de envejecimiento adicional, sólo calentando la mezcla a su temperatura de compactación, y mezcla asfáltica extraída en terreno, compactada en laboratorio (extraída desde finisher). Por esta razón se logra medir los módulos de las mezclas asfálticas en caliente con asfalto multigrado, modificado con polímeros y modificado con polvo de caucho fabricadas en laboratorio y mezcla fabricada en planta. Además, se extraen testigos, que permiten tener una medición de mezcla puesta en terreno.

Tabla 4-16: Resultados módulo resiliente para tramos de prueba

Módulo Resiliente [Mpa]		Terreno	% vacíos medio	Laboratorio	% vacíos medio	Testigos	Estudio anterior LNV
15º	Polímero	3317	8,8	3950	5,9	4040	2995
	Multigrado	6073	8,2	4192	5,6	5903	3798
	AC	8608	5,4	8105	5,0	7466	8267
25º	Polímero	1359	8,8	1444	5,9	1723	1332
	Multigrado	2454	8,2	1405	5,6	2565	1304
	AC	3883	5,4	3262	5,0	3602	4023

En promedio, se observan valores de rigidez mayores en el caso del asfalto con caucho, para todos los tipos de extracción y temperatura de ensayo.

En el caso de dos mezclas en particular: asfalto modificado con polímeros y asfalto con caucho, los valores de módulo se mantienen relativamente constantes, no importando el tipo de extracción que se usa. No así el caso del asfalto multigrado, quien para la fabricación en laboratorio presenta un módulo de rigidez similar al módulo del asfalto modificado con polímeros; mientras que para extracción de terreno (desde finisher) y también para testigos el valor de módulo aumenta considerablemente. Esto no se puede explicar por el porcentaje de vacíos que poseen las probetas, puesto que, a modo de contraejemplo, está el asfalto modificado con polímeros, donde los porcentajes de vacíos también cambian debido al tipo extracción, pero el valor de módulo de rigidez no varía como en el caso del asfalto multigrado.

Por tanto, se puede considerar que la diferencia presentada por los valores de módulo en multigrado proviene del tipo de asfalto y su comportamiento ante el envejecimiento, ya que su módulo aumenta considerablemente al sufrir un proceso de envejecimiento mayor – como es la situación en una extracción de terreno y de extracción de testigos –; siendo distinta la situación para el asfalto con caucho y el asfalto modificado con polímeros, que no sufren variaciones considerables ante un envejecimiento mayor.

4.5.2 Ahuellamiento bajo agua

El ensayo de ahuellamiento se realiza con el equipo rueda de Hamburgo, en condiciones húmedas, a 50°C, según el procedimiento descrito por la norma AASHTO T324-14. Para la realización del ensaye, se confeccionan probetas cilíndricas de tipo Superpave (150 [mm] de diámetro y 60 [mm] de altura) en el compactador giratorio. En este caso, se optó por compactar al 97% de la densidad Marshall, tal como se aplica en terreno, para así obtener un resultado más cercano con respecto a lo colocado en la ruta. Cabe destacar que la norma solicita un porcentaje de vacíos en la mezcla de 7% $\pm$ 1%, no obstante, en el tramo de prueba se usó la metodología Marshall y para obtener un dato cercano a lo usado en el camino, se opta por emplear la densidad de terreno.

Este ensayo se realizó con probetas confeccionadas con mezcla extraída en terreno compactada en laboratorio basándose en el procedimiento descrito en ASTM D3202 sin aplicar un procedimiento de envejecimiento adicional, solo calentando la mezcla hasta llegar a la temperatura de compactación; y mezcla confeccionada en laboratorio aplicándose un envejecimiento primario de acuerdo con la Norma AASHTO R 30-02 (4 horas a 135°C), que establece procedimientos para el acondicionamiento de las probetas confeccionadas en laboratorio.

De los resultados obtenidos, es necesario observar:

- Punto de desprendimiento del asfalto, que es el punto donde el bitumen con el árido se despega y la mezcla pierde abruptamente calidad estructural.
- Punto de deflexión máxima, que es la profundidad de huella al finalizar el ensaye, mostrando la resistencia final de un asfalto a la falla por ahuellamiento.

A pesar de ensayar dos probetas por cada tipo de extracción, en la tabla resumen se utiliza el ensaye más desfavorable (huella de mayor tamaño), con tal de tener el dato extremo, que permita comparar la situación menos deseable del ahuellamiento bajo agua de los tramos de prueba. Asociado a estos ensayes, se presentan los gráficos de cada ensaye en la Rueda de Hamburgo, para los seis casos expuestos.

Tabla 4-17: Resultados Ahuellamiento para tramos de prueba

Tipo de Mezcla	Tipo de Mezclado	Número de Pasadas	Ahuellamiento Máximo [mm]	% Vacíos en la mezcla
Multigrado	Laboratorio	20.000	3,23	7,5
Asfalto con Polímeros	Laboratorio	20.000	4,34	7,1
Asfalto con caucho	Laboratorio	20.000	1,98	5,9
Multigrado	Terreno	20.000	4,75	7,0
Asfalto con Polímeros	Terreno	20.000	4,04	7,4
Asfalto con caucho	Terreno	20.000	2,02	5,7

Se agregan datos de ahuellamiento obtenidos en la UTFSM, para diferentes tipos de asfalto (modificado con polímeros y asfalto tradicional), a modo de comparación.

Tabla 4-18: Resultados Ahuellamiento UTFSM

Tipo de mezcla	Número de pasadas	Ahuellamiento [mm]	% vacíos
VI-A-12 Tradicional 1 [4]	10000	9,0	7,6
VI-A-12 Tradicional 2 [4]	10000	9,4	7,6
VI-A-12 Modificado con polímeros 1 [4]	20000	5,0	7,6
VI-A-12 Modificado con polímeros 2 [4]	20000	5,3	7,4
Asfalto Modificado con Polímeros PG 82-22 [12]	20000	1,2	7,0

Se resumen los resultados anteriores en un gráfico para facilitar la comparación.

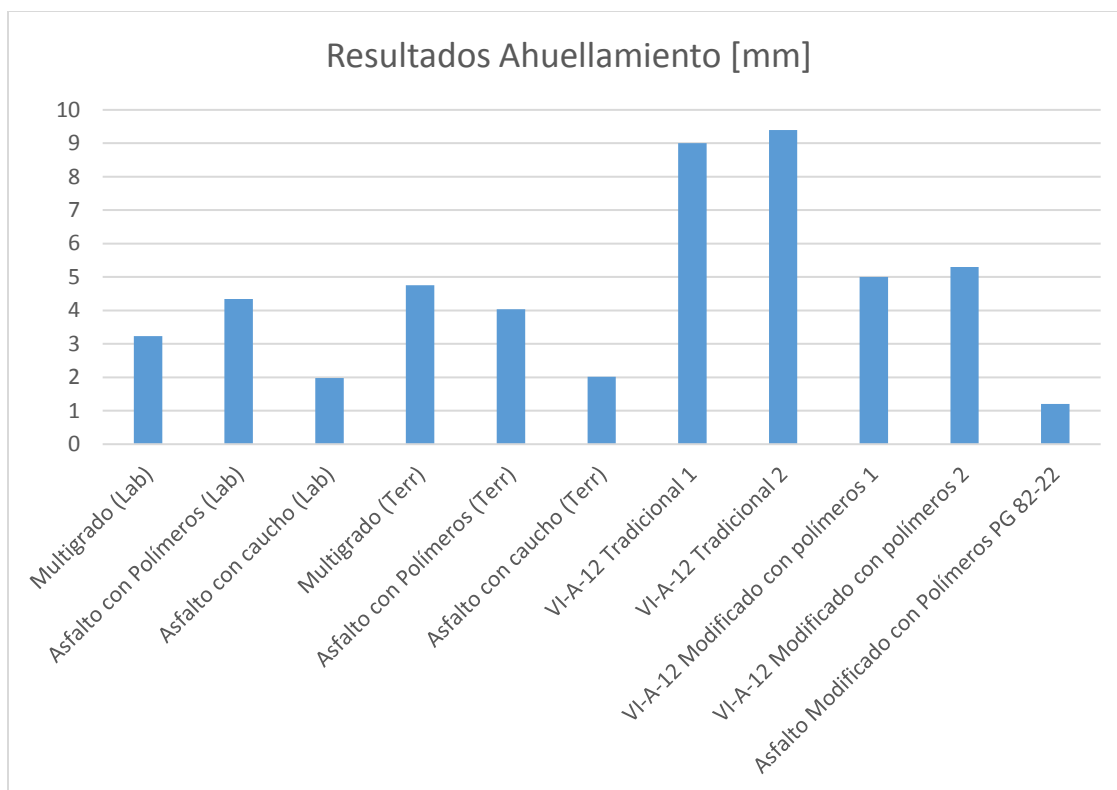


Figura 4-6: Resultados de Ahuellamiento para ensayos realizados en LNV y en UTFSM

El detalle de los ensayos de Rueda de Hamburgo realizados en el LNV, se presentan a continuación.

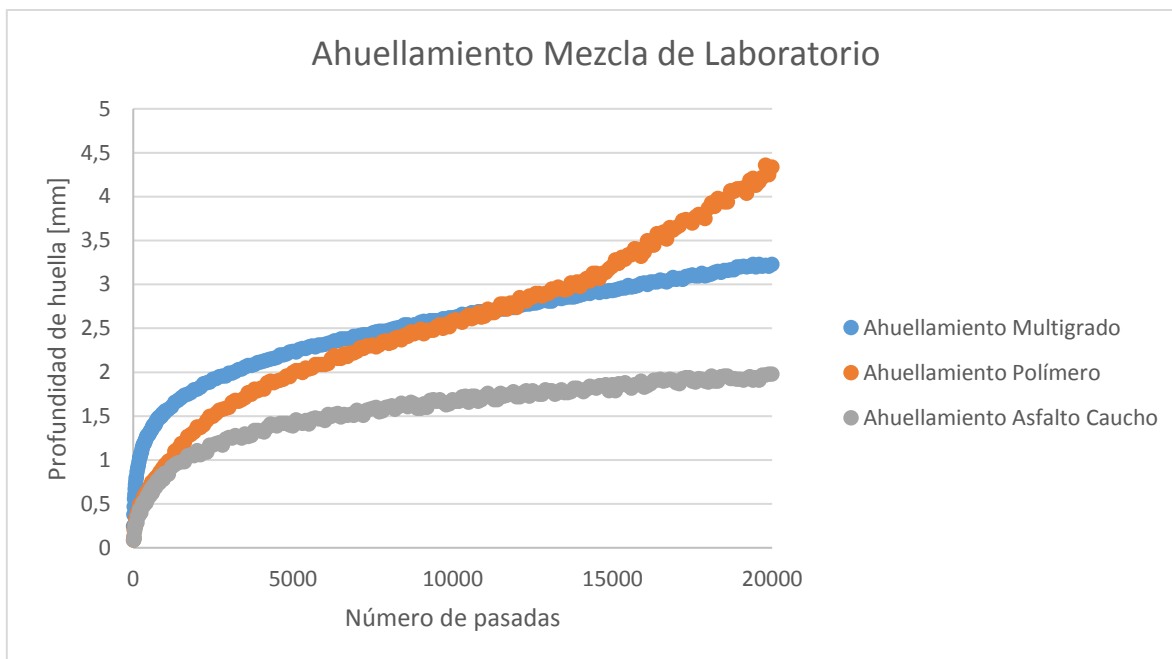


Figura 4-7: Ahuellamiento de las mezclas confeccionadas en laboratorio

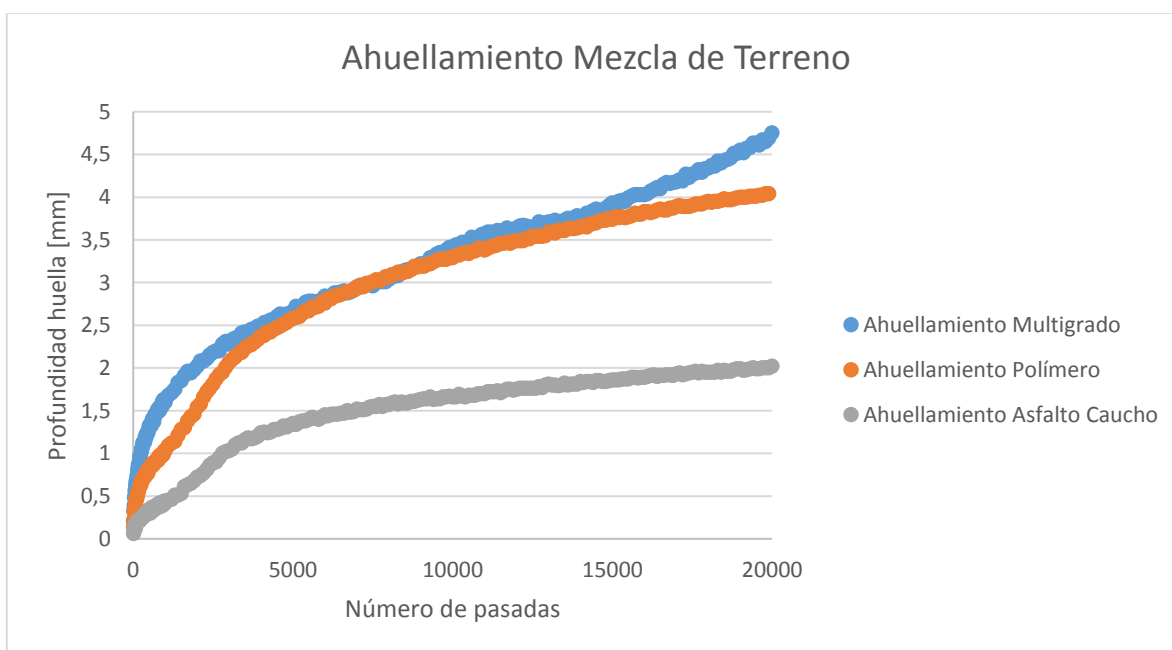


Figura 4-8: Ahuellamiento de las mezclas, extracción en terreno

Se observa que, tanto para la mezcla confeccionada en planta como la mezcla confeccionada en laboratorio, el pavimento de asfalto con caucho tiene una resistencia al ahuellamiento muy positiva, tanto por la profundidad de huella como por la ausencia de desprendimiento de los agregados. Cabe destacar, que tanto la mezcla modificada con polímeros y la mezcla de asfalto multigrado tienen una profundidad de huella bastante alejada del límite de 20[mm], y no se observa un desprendimiento del agregado considerable, por lo que se puede decir que tienen un rendimiento satisfactorio para la falla de ahuellamiento. Luego, todas las mezclas aprobaron satisfactoriamente el ensayo de la rueda de Hamburgo.

En torno a la relación entre los parámetros volumétricos y los resultados del ensayo, no se puede establecer una correlación clara entre estos parámetros. En el caso de la comparación con la mezcla ya ensayada en la UTFSM, se puede apreciar que la profundidad de huella, para asfalto modificado con polímeros, es igual de baja, por lo cual, se concluye que la mezcla de asfalto con polímeros de producción nacional es excelente para resistir la falla por ahuellamiento. Finalmente, se destaca que, en el caso de las probetas de asfalto con caucho y asfalto modificado con polímeros, no existen diferencias considerables en el método de extracción utilizado, a pesar de que en ambos métodos se utiliza un proceso de envejecimiento diferente.

4.5.3 Fatiga

Existen muchos métodos de evaluación de un pavimento en su resistencia a la fatiga, y se elige el método de viga de cuatro puntos, normado por AASHTO T321-07, donde se carga una probeta prismática a repetidos esfuerzos de flexión, provocando su falla por efectos de fatiga.

En el presente estudio, se realiza el ensayo con mezcla asfáltica producida en planta y extraída desde la colocación en terreno; se toma esta decisión por la cantidad de material que involucra el ensayo, puesto que se debe no sólo establecer las curvas para tres tipos de mezclas, sino que hay que tener mezcla suficiente para probar una rutina de compactación que permita tener una densidad cercana a la usada en terreno.

El proceso para realizar este ensayo consta de una serie de pasos: extracción, compactación, fabricación de vigas prismáticas y ensayo, detallados a continuación:

4.5.3.1 Extracción de la mezcla

Se define la extracción desde finisher, basándose en el punto 7 de la norma AASHTO T321-07: “Sampling and Specimen Preparation for Plant Mixed Laboratory Compacted Specimens”.

Se debe considerar una extracción de mezcla uniforme, para varios camiones, en los momentos intermedios de la colocación, para asegurar la calidad y homogeneidad del muestreo. El almacenaje se realiza en pailas de 25 [kg] de capacidad, tapándose para evitar la contaminación del asfalto.

4.5.3.2 Compactación de la mezcla

Debido a que la mezcla ha sido sometida a un envejecimiento primario desde la planta al camino, no se procede a hacer un envejecimiento de este tipo en el laboratorio, solo se calienta la mezcla hasta alcanzar su temperatura de compactación. El envejecimiento secundario propuesto en AASHTO 30-02 se descarta, debido a que aumentará la rigidez de la mezcla y puede dificultar el proceso de compactación a la cantidad de vacíos deseada.

Para el proceso de compactación, se usa la norma AASHTO PP3, que entrega las directrices para trabajar en el compactador de rodillo.

Como primer paso, se debe calentar la mezcla a la temperatura de compactación, para su posterior vaciado en moldes precalentados de 100 [mm] de alto, 320 [mm] de ancho y 400 [mm] de largo; luego, se procede a la compactación usando el compactador de rodillo, el cuál debe ser ajustado a una rutina específica para conseguir la densidad requerida de la mezcla (en este caso se trabaja al 97% de la densidad óptima informada en el diseño). La rutina usada con el compactador de rodillo es:

Tabla 4-19: Rutina usada en compactador de rodillo

Ciclos	Presión [Bar]
2	0,7
3	1,6
3	3,0
3	3,6
3	4,2

Una vez compactada, se debe dejar enfriar a temperatura ambiente durante 24 [h], para poder proceder al corte de las vigas prismáticas.

4.5.3.3 Vigas prismáticas

Se aplican los procedimientos que apliquen de la norma ASTM D3549. A través de una sierra se cortan 3 probetas prismáticas por molde, de 50 [mm] de alto, 63 [mm] de ancho y 380 [mm] de largo, con una tolerancia de ± 6 [mm]; se debe procurar mantener la medida a lo largo de todo el corte, para que las mordazas del equipo se mantengan paralelas durante el ensaye. Al menos deben existir 6 [mm] de separación al cortarse las 3 probetas, para asegurar superficies suaves y paralelas.

Para el almacenamiento de estas vigas, se debe procurar tener una superficie limpia, seca y que tenga espacio suficiente para no apilar vigas.

4.5.3.4 Ensayo de viga de cuatro puntos

Basándose en la norma AASHTO T321-07, se establecen parámetros que hacen comparables los ensayos con los ya efectuados por el Laboratorio Nacional de Vialidad anteriormente.

- Largo efectivo: dimensión por defecto que entrega el equipo, que es el largo usado en el diagrama de cuerpo libre para las ecuaciones de equilibrio asociadas, de valor: 355,5 [mm].
- Espacio entre cargas: dimensión dada por el equipo, equivalente a 1/3 del largo efectivo.
- Masa de viga: depende de cada viga, sin límites ni rango.
- Modo de control de ensayo: se aplica el método de deformación controlada, donde la rigidez a la flexión se va reduciendo hasta que alcanza un 50% de la rigidez inicial.
- Frecuencia: Se fija una frecuencia de ensayo de 10 [Hz].
- Deformación unitaria: se maneja un rango entre los 200 [μStrain] y los 600 [μStrain] para el uso de las probetas, en algunos casos se acorta el rango debido a que no se alcanzan los 10000 ciclos de carga mínimos sugeridos por norma.
- Temperatura: se usa una cámara de frío que mantiene la temperatura en 20 ± 1 [°C], la cual representa una media estimada de la temperatura de la zona central de Chile.

El cálculo de los parámetros se detalla en la norma AASHTO T321-07. A continuación, se resumen los datos finales obtenidos en los ensayos de los tres tipos de asfalto utilizados.

Tabla 4-20: Resultados ensaye de fatiga, asfalto con polímeros

Deformación Unitaria [ustrain]	Densidad [Kg/m3]	% Comp. Marshall	% Vacíos	N° Ciclos de falla	Rigidez Inicial [MPa]	Rigidez Final [MPa]	Energía Disipada Acumulada [MJ/m3]	Ángulo Fase [°]
600	2255,6	96,6	8,5	2500	2064	1031	0,5989	38,244
500	2267,3	97,1	8,0	7940	2082	1037	1,276	38,332
400	2255,6	96,6	8,5	23984	2267	1134	2,4677	36,819
300	2255,6	96,6	8,5	111291	2393	1196	6,58	34,38

Tabla 4-21: Resultados ensaye de fatiga, asfalto multigrado

Deformación Unitaria [ustrain]	Densidad [Kg/m3]	% Comp. Marshall	% Vacíos	N° Ciclos de falla	Rigidez Inicial [MPa]	Rigidez Final [MPa]	Energía Disipada Acumulada [MJ/m3]	Ángulo Fase [°]
600	2246,0	96,3	8,7	413	3462	1707	0,0898	22,623
500	2258,0	96,8	8,2	3500	2994	1496	0,605	29,71
400	2248,5	96,4	8,6	3116	3569	1782	0,4287	28,182
300	2248,5	96,4	8,6	3917	3184	1590	0,2559	27,676
300	2246,0	96,3	8,7	2729	3400	1698	0,143	22,415

Tabla 4-22: Resultados ensaye de fatiga asfalto con caucho

Deformación Unitaria [ustrain]	Densidad [Kg/m3]	% Comp. Marshall	% Vacíos	N° Ciclos de falla	Rigidez Inicial [MPa]	Rigidez Final [MPa]	Energía Disipada Acumulada [MJ/m3]	Ángulo Fase [°]
600	2249,3	96,7	8,2	1900	5105	2550	0,8002	30,373
500	2249,3	96,7	8,2	9878	4928	2462	2,7301	29,377
400	2278,8	98,0	7,0	11243	6724	3355	2,57	27,443
400	2249,3	96,7	8,2	7610	5316	2655	1,464	28,9398
300	2261,3	97,3	7,7	26272	5346	2672	2,681	27,964
200	2278,8	98,0	7,0	340012	7674	4464	8,7661	25,646

A continuación, se presentan las curvas de fatiga asociado a ciclos de falla vs deformación para los tres asfaltos analizados.

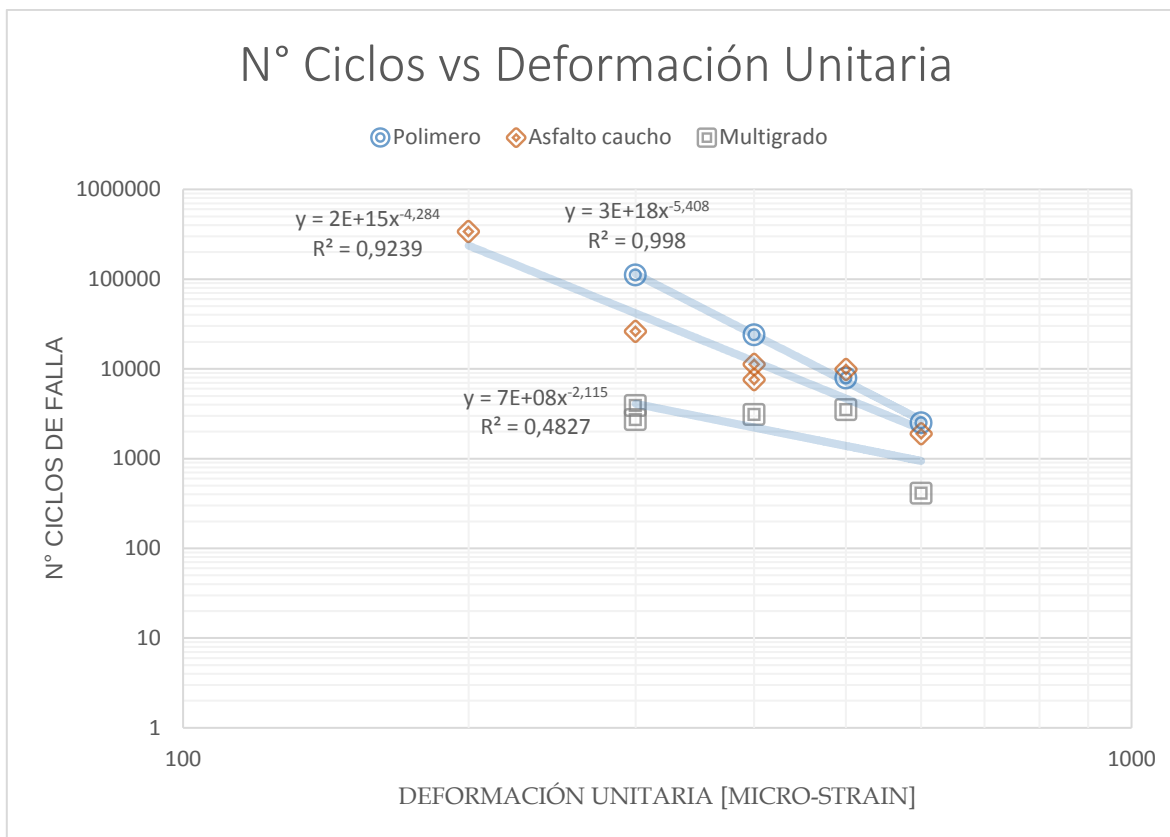


Figura 4-9: Curva de fatiga para los tres asfaltos estudiados

Para otros datos asociados a los ensayos de fatiga, véase el Anexo A.

Se logra observar una clara ventaja en comportamiento del asfalto modificado con polímeros por sobre la mezcla de asfalto modificado con polvo de caucho, debido a la mayor cantidad de ciclos soportados por las probetas; además se observa que la pendiente de la curva logarítmica es mayor para el polímero, aumentando su capacidad de resistir gran cantidad de esfuerzos repetidos.

La mezcla de asfalto multigrado, entrega un comportamiento a fatiga absolutamente aleatorio.

A modo de comparación, se agregan los resultados de ensayos de fatiga de mezclas con granulometría IV-A-12, efectuados en el LEMCO de la UTFSM:

- Mezcla tradicional, granulometría IV-A-12, confección USM.
- Mezcla modificada con polímeros, granulometría IV-A-12, confección USM.
- Mezcla modificada con polímeros, granulometría IV-A-12, confección USM para Autopista del Maipo.

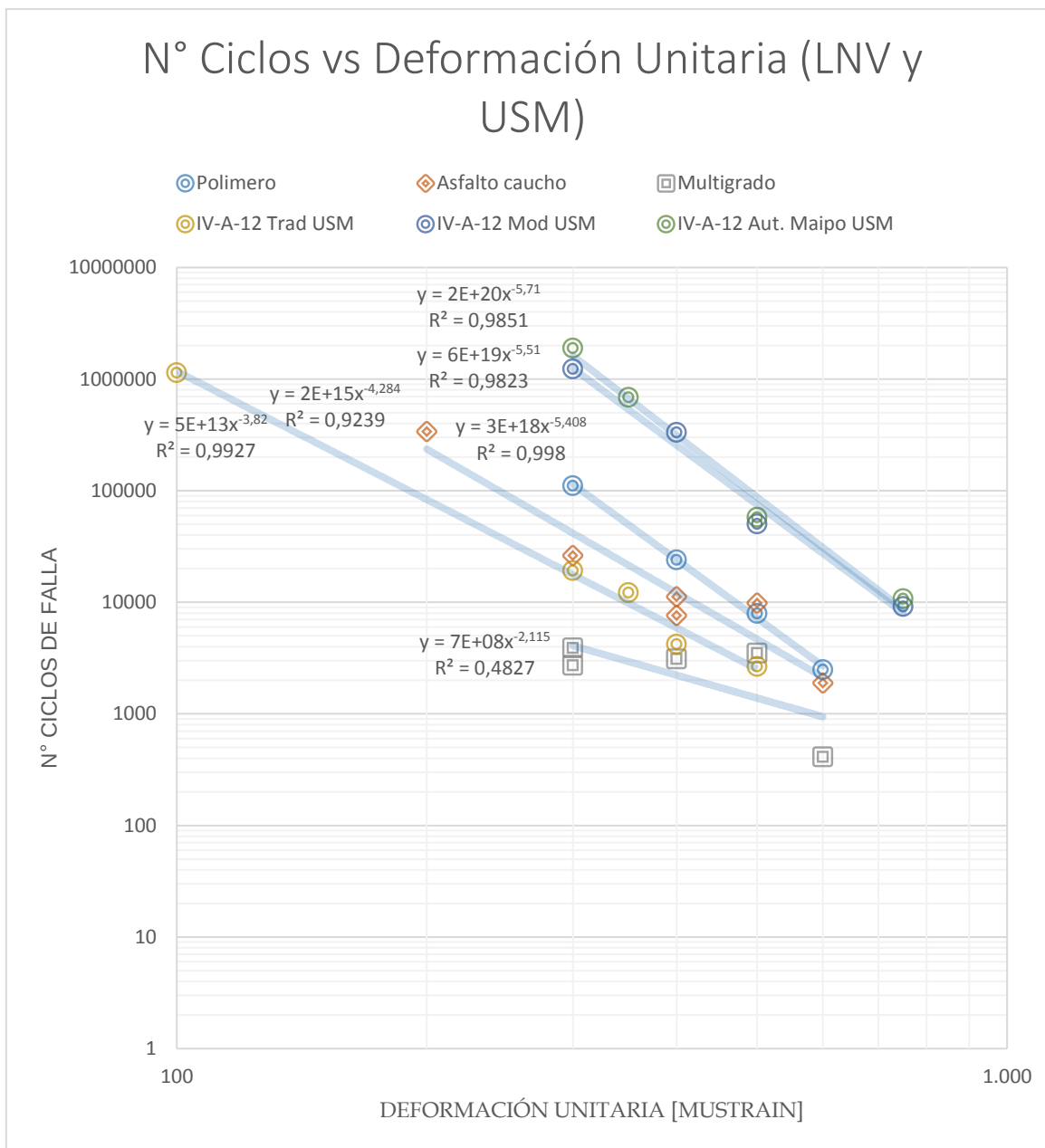


Figura 4-10: Curvas de fatiga para ensayos realizados en LNV y en LEMCO, UTFSM [13] [14].

Se observa que el asfalto con caucho tiene un comportamiento a fatiga levemente superior al asfalto tradicional, pero está muy por debajo de los resultados obtenidos para asfaltos modificados con polímeros.

4.6 Controles funcionales y estructurales al pavimento terminado

Se realizan controles de auscultación luego de terminado el pavimento, para analizar las características de la carpeta, por parte del Subdepartamento de Auscultaciones del LNV.

4.6.1 Control del espesor de la carpeta

Se extraen testigos desde el camino, para controlar el espesor del pavimento, basándose en 8.302.41 del M.C-V.8.

Tabla 4-23: Control de espesor de carpeta en tramo de prueba

Tramo de prueba	Kilometraje	Altura [mm]
Asfalto con caucho	400	57
Asfalto con caucho	500	55
Asfalto con caucho	600	53
Asfalto con caucho	700	58
Asfalto Multigrado	900	49
Asfalto Multigrado	1000	54
Asfalto Multigrado	1200	56
Asfalto Multigrado	1200	47
Asfalto con Polímeros	1400	55
Asfalto con Polímeros	1400	65
Asfalto con Polímeros	1600	57
Asfalto con Polímeros	1700	58

4.6.2 Control de rugosidad

La regularidad superficial se realiza por el método de perfilometría longitudinal, procedimiento descrito en 8.502.8 del M.C.-V.8. Este parámetro se mide el día 21 de febrero de 2017 (a dos años de entregado a tránsito).

Se utiliza el perfilómetro laser MLP, del LNV. Los resultados se toman cada 50 [m] longitudinales.

Tabla 4-24: Datos de IRI en tramo de prueba de asfalto con caucho, pista 1

Pista	Km. Inicio	Km. Final	Long. Tramo	IRI m/km.
1	0,300	0,350	0,050	2,1
	0,350	0,400	0,050	1,8
	0,400	0,450	0,050	1,7
	0,450	0,500	0,050	1,6
	0,500	0,550	0,050	1,7
	0,550	0,600	0,050	1,1
	0,600	0,650	0,050	1,7
	0,650	0,700	0,050	1,2
	0,700	0,750	0,050	1,6
	0,750	0,800	0,050	1,6

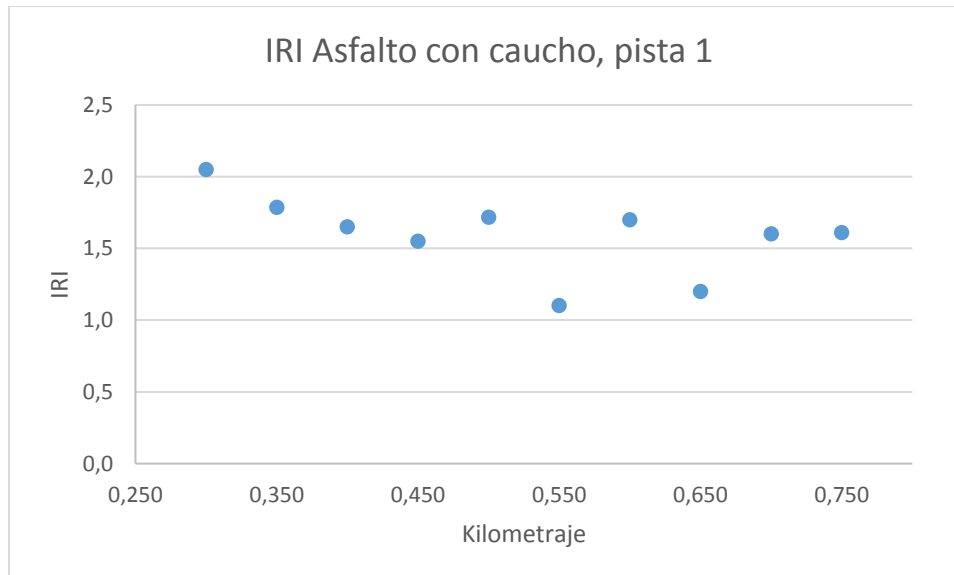


Figura 4-11: IRI de tramo asfalto con caucho en pista 1

Tabla 4-25: Datos de IRI en tramo de prueba de asfalto con caucho, pista 2

Pista	Km. Inicio	Km. Final	Long. Tramo	IRI m/km.
2	0,800	0,750	0,050	1,6
	0,750	0,700	0,050	1,6
	0,700	0,650	0,050	1,6
	0,650	0,600	0,050	1,6
	0,600	0,550	0,050	1,5
	0,550	0,500	0,050	1,1
	0,500	0,450	0,050	1,8
	0,450	0,400	0,050	1,8
	0,400	0,350	0,050	1,4
	0,350	0,300	0,050	1,8

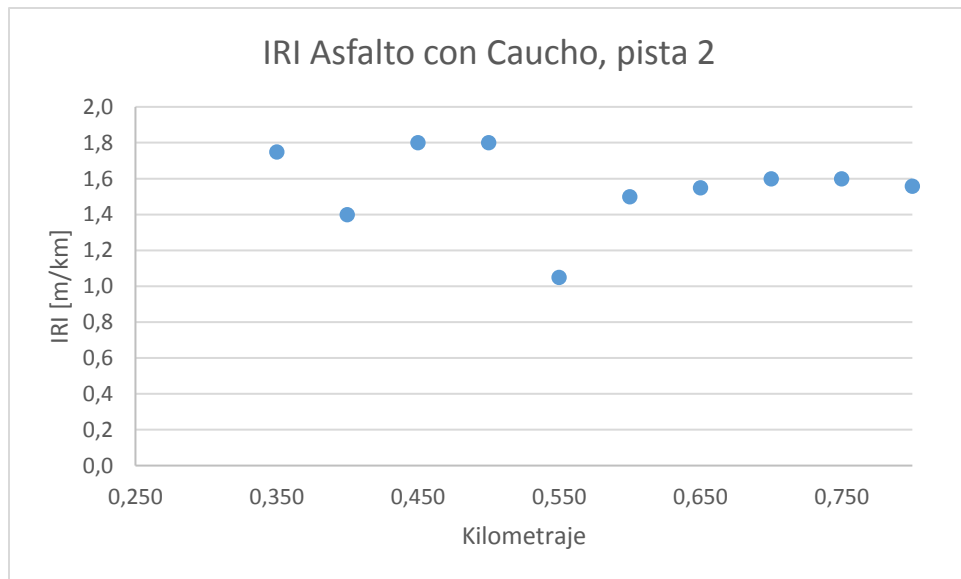


Figura 4-12: IRI de tramo asfalto con caucho en pista 2

Tabla 4-26: Datos de IRI en tramo de prueba de asfalto multigrado, pista 1

Pista	Km. Inicio	Km. Final	Long. Tramo	IRI m/km.
1	0,800	0,850	0,050	1,3
	0,850	0,900	0,050	1,0
	0,900	0,950	0,050	1,2
	0,950	1,000	0,050	1,3
	1,000	1,050	0,050	1,2
	1,050	1,100	0,050	1,4
	1,100	1,150	0,050	-
	1,150	1,200	0,050	1,1
	1,200	1,250	0,050	1,0
	1,250	1,300	0,050	1,5

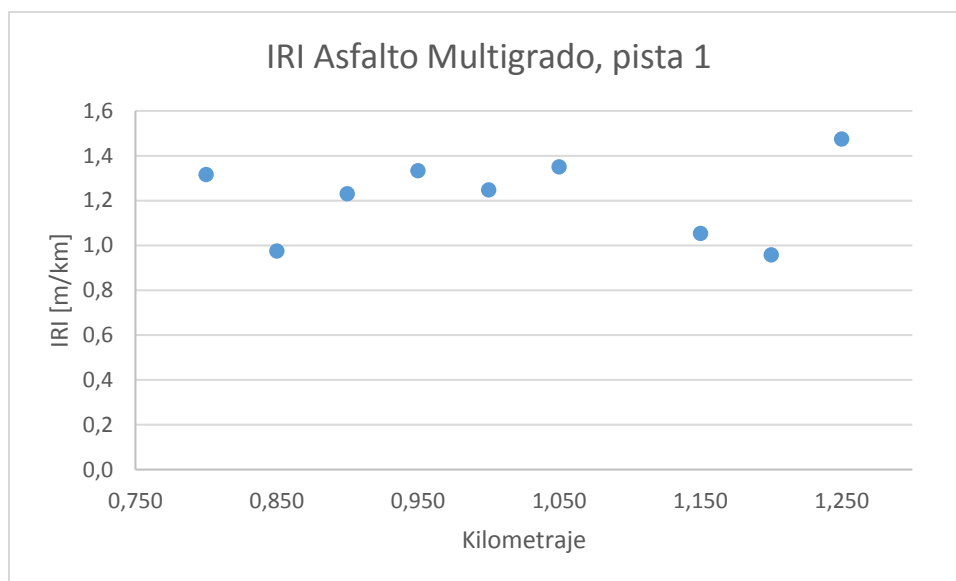


Figura 4-13: IRI de tramo asfalto multigrado en pista 1

Tabla 4-27: Datos de IRI en tramo de prueba de asfalto multigrado, pista 2

Pista	Km. Inicio	Km. Final	Long. Tramo	IRI m/km.
2	1,300	1,250	0,050	1,5
	1,250	1,200	0,050	1,0
	1,200	1,150	0,050	1,0
	1,150	1,100	0,050	1,0
	1,100	1,050	0,050	-
	1,050	1,000	0,050	1,3
	1,000	0,950	0,050	1,4
	0,950	0,900	0,050	1,4
	0,900	0,850	0,050	1,3
	0,850	0,800	0,050	1,5

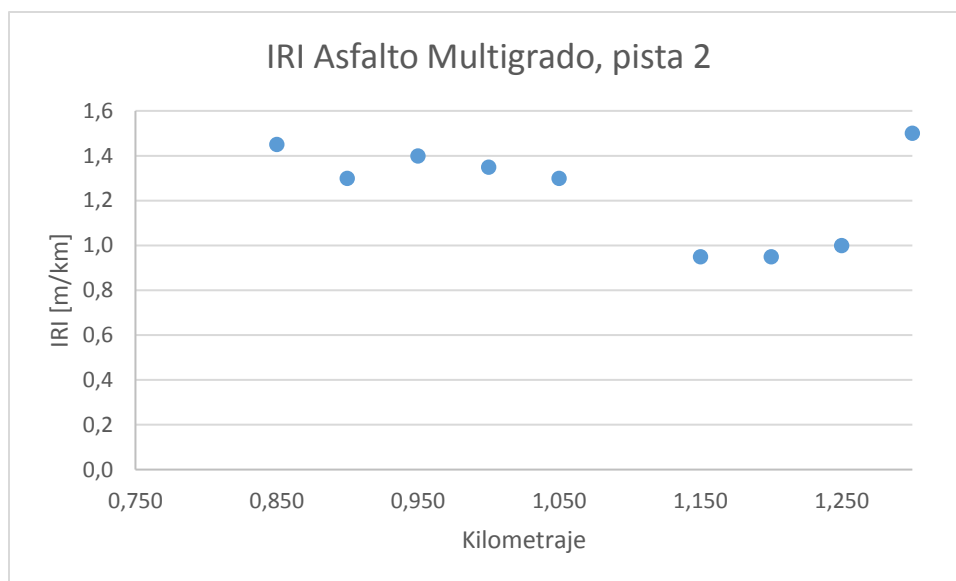


Figura 4-14: IRI de tramo asfalto multigrado en pista 2

Tabla 4-28: Datos de IRI en tramo de prueba de asfalto modificado con polímeros, pista 1

Pista	Km. Inicio	Km. Final	Long. Tramo	IRI m/km.
1	1,300	1,350	0,200	1,4
	1,350	1,400	0,200	1,0
	1,400	1,450	0,200	1,0
	1,450	1,500	0,200	1,1
	1,500	1,550	0,200	1,0
	1,550	1,600	0,200	1,0
	1,600	1,650	0,200	1,2
	1,650	1,700	0,200	1,2
	1,700	1,750	0,200	0,9
	1,750	1,800	0,200	1,2

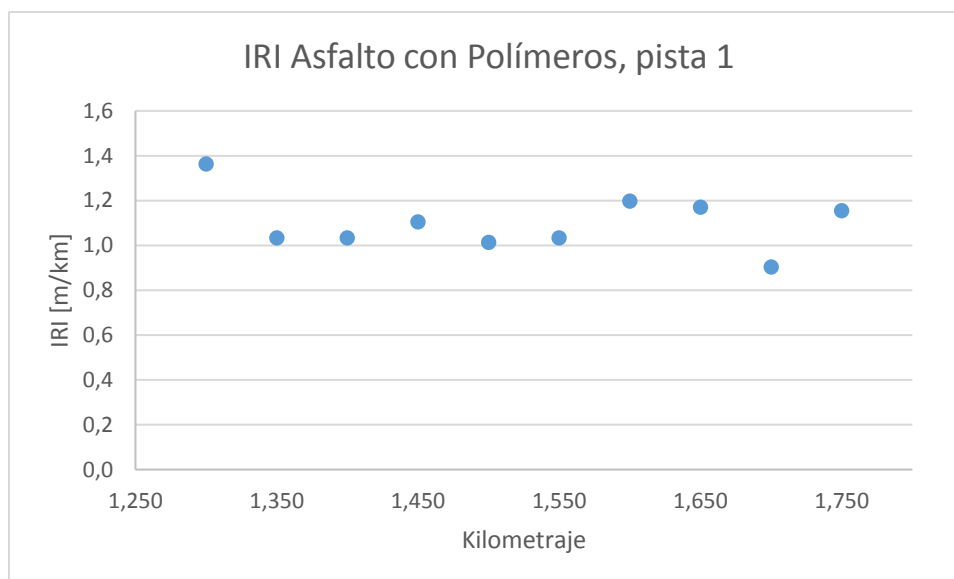


Figura 4-15: IRI en tramo asfalto con polímeros en pista 1

Tabla 4-29: Datos de IRI en tramo de prueba de asfalto modificado con polímeros, pista 2

Pista	Km. Inicio	Km. Final	Long. Tramo	IRI m/km.
2	1,800	1,750	0,200	-
	1,750	1,700	0,200	1,0
	1,700	1,650	0,200	1,0
	1,650	1,600	0,200	1,2
	1,600	1,550	0,200	-
	1,550	1,500	0,200	-
	1,500	1,450	0,200	1,9
	1,450	1,400	0,200	1,8
	1,400	1,350	0,200	2,1
	1,350	1,300	0,200	1,1

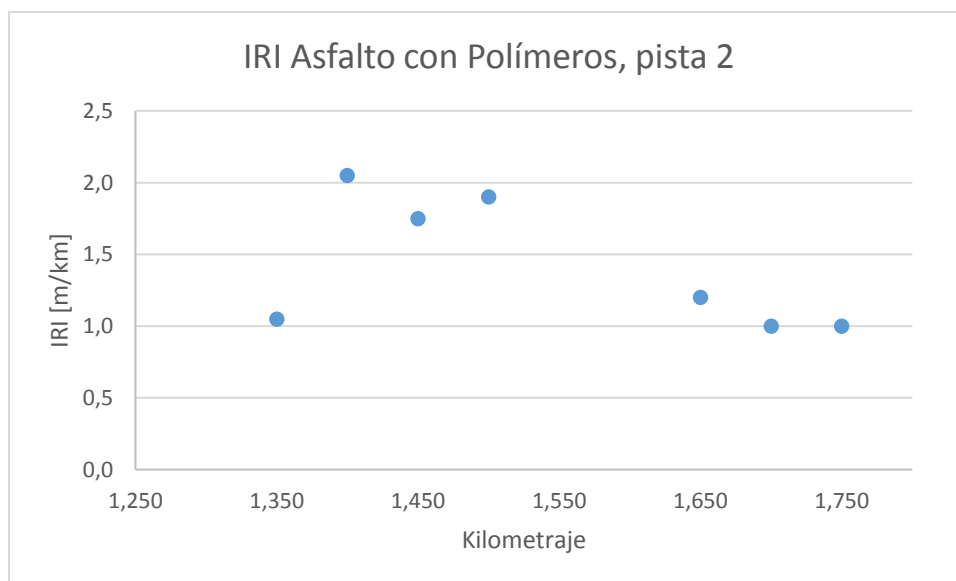


Figura 4-16: IRI en tramo asfalto con polímeros en pista 2

4.6.3 Control de resistencia al deslizamiento con péndulo británico

Se mide la resistencia al deslizamiento a través del Péndulo Británico (TRRL). Se mide la pérdida de energía del péndulo que posee características conocidas. Se sigue el procedimiento de medición descrito en 8.502.16 del M.C-V.8. La medición se lleva a cabo dos años después de entregado el tramo a tránsito. Los resultados obtenidos se observan a continuación.

Tabla 4-30: Resultados de deslizamiento con TRRL en tramo de prueba

Tipo de Asfalto	Pista	BPNa	RD (fricción)	Fecha
Asfalto con caucho	1	64,03	0,64	12/04/2017
Asfalto con caucho	2	60,03	0,60	12/04/2017
Asfalto Multigrado	1	59,85	0,60	04/04/2017
Asfalto Multigrado	2	59,48	0,59	04/04/2017
Asfalto con polímeros	1	59,03	0,59	05/04/2017
Asfalto con polímeros	2	56,90	0,57	05/04/2017

4.6.4 Control de fricción transversal

La fricción transversal del camino se controla a usando el vehículo SCRIM del LNV, según el método descrito en 8.502.17 del M.C-V.8. Se efectúa en forma continua, para ambas pistas.

Tabla 4-31: Resultados de fricción con SCRIM en tramo de asfalto con caucho (07/03/2017)

Pista	Km Inicial	Km Final	Long. Tramo	Fricción
1	0,300	0,350	0,050	0,46
1	0,350	0,400	0,050	0,47
1	0,400	0,450	0,050	0,39
1	0,450	0,500	0,050	0,33
1	0,500	0,550	0,050	0,32
1	0,550	0,600	0,050	0,37
1	0,600	0,650	0,050	0,38
1	0,650	0,700	0,050	0,37
1	0,700	0,750	0,050	0,39
1	0,750	0,800	0,050	0,41
2	0,800	0,750	0,050	0,31
2	0,750	0,700	0,050	0,31
2	0,700	0,650	0,050	0,30
2	0,650	0,600	0,050	0,31
2	0,600	0,550	0,050	0,31
2	0,550	0,500	0,050	0,32
2	0,500	0,450	0,050	0,33
2	0,450	0,400	0,050	0,33
2	0,400	0,350	0,050	0,32
2	0,350	0,300	0,050	0,29

Tabla 4-32: Resultados de fricción con SCRIM en tramo de asfalto multigrado (07/03/2017)

Pista	Km Inicial	Km Final	Long. Tramo	Fricción
1	0,800	0,850	0,050	0,43
1	0,850	0,900	0,050	0,42
1	0,900	0,950	0,050	0,39
1	0,950	1,000	0,050	0,39
1	1,000	1,050	0,050	0,40
1	1,050	1,100	0,050	Detención
1	1,100	1,150	0,050	Lomo de toro
1	1,150	1,200	0,050	Lomo de toro
1	1,200	1,250	0,050	0,46
1	1,250	1,300	0,050	0,45
2	1,300	1,250	0,050	0,34
2	1,250	1,200	0,050	0,35
2	1,200	1,150	0,050	0,39
2	1,150	1,100	0,050	0,32
2	1,100	1,050	0,050	Lomo de toro
2	1,050	1,000	0,050	Lomo de toro
2	1,000	0,950	0,050	0,31
2	0,950	0,900	0,050	0,33
2	0,900	0,850	0,050	0,29
2	0,850	0,800	0,050	0,31

Tabla 4-33: Resultados de fricción con SCRIM en tramo de asfalto modificado con polímeros (07/03/2017)

Pista	Km Inicial	Km Final	Long. Tramo	Fricción
1	1,300	1,350	0,050	0,45
1	1,350	1,400	0,050	0,44
1	1,400	1,450	0,050	0,42
1	1,450	1,500	0,050	0,48
1	1,500	1,550	0,050	0,48
1	1,550	1,600	0,050	0,47
1	1,600	1,650	0,050	0,45
1	1,650	1,700	0,050	0,44
1	1,700	1,750	0,050	0,41
1	1,750	1,800	0,050	Detención
2	1,800	1,750	0,050	FFCC
2	1,750	1,700	0,050	0,39
2	1,700	1,650	0,050	0,37
2	1,650	1,600	0,050	0,36
2	1,600	1,550	0,050	Detención
2	1,550	1,500	0,050	Lomo de toro
2	1,500	1,450	0,050	Lomo de toro
2	1,450	1,400	0,050	0,35
2	1,400	1,350	0,050	0,33
2	1,350	1,300	0,050	0,33

4.6.5 Control de macrotextura

Para el control de la macrotextura en la superficie del pavimento se usa el círculo de arena, con el método descrito en 8.502.17 del M.C.-V.8. Se realiza cada 100 [m] longitudinales.

El ensayo de efectúa de manera puntual, con un volumen de arena de 25 [cc], en la huella externa de cada pista. Se realizó aproximadamente dos años después de la colocación del asfalto.

Tabla 4-34: Resultados de macrotextura a través del ensaye de Círculo de Arena

Tipo de Asfalto	Pista	MTD [mm]	Fecha
Asfalto con caucho	1	0,7	12/04/2017
Asfalto con caucho	2	0,6	12/04/2017
Asfalto Multigrado	1	0,5	04/04/2017
Asfalto Multigrado	2	0,4	04/04/2017
Asfalto con Polímeros	1	0,5	05/04/2017
Asfalto con Polímeros	2	0,5	05/04/2017

Se realiza el ensaye según el procedimiento 5.408.303 (3) a) del M.C-V.5. Al tratarse de un tramo de prueba, la exigencia no aplica como control receptivo, pero sirve para tener un parámetro de la situación en terreno.

4.6.6 Análisis de resultados

Se aprecia que los espesores cumplen con el mínimo proyectado de 50 [mm], cumpliendo con que las muestras individuales tengan al menos el 92% del espesor proyectado, según 5.408.304 (2) del M.C.-V.5, tomándose como referencia solamente, ya que los tramos de prueba no están afectados a multas.

Se observa un IRI relativamente similar para los tres tramos. Se estima una situación normal considerando que se aplica el asfalto bajo una base común, usando las mismas máquinas compactadoras y las mismas cuadrillas de trabajo en terreno.

Se observa que los datos de fricción se encuentran cercanos entre sí, por tanto, con este tipo de medición, no se establecen mayores diferencias en la resistencia al deslizamiento longitudinal entre los tramos de prueba.

En términos comparativos, el asfalto con caucho presenta una macrotextura de mejor calidad para el rodado, no obstante, se debe tomar en cuenta que la medición fue realizada dos años después de dado el tránsito, por lo cual los valores tan cercanos al límite sugerido están influenciados por el tráfico, ya que los vehículos tienden a limar la superficie y disminuir el MTD.

Conclusiones

Se presentan las conclusiones, tanto generales como específicas, extraídas de este trabajo, sumado a recomendaciones para estudios futuros en torno a asfaltos modificados.

Conclusiones generales

Como primera acotación, cabe destacar que se logra construir un tramo de prueba con tres asfaltos de tipo modificado, en una zona de particular interés debido al intenso tráfico de camiones por la zona, sumado al crecimiento del sector inmobiliario en Catapilco, lo cual hace crecer rápidamente las solicitudes de vehículos en el sector de estudio.

Con respecto al diseño de la mezcla asfáltica utilizada en los tramos, se considera que, para el asfalto multigrado y el asfalto modificado con polímeros, se aplica la dosificación Marshall tradicional, normada por 8.302.47 del M.C.-V.8, y para el asfalto con caucho se deben seguir los procedimientos expresados en 5.420.302 del M.C.-V.5, de esta manera se asegura la correcta digestión entre asfalto y caucho. Para la dosificación de la mezcla asfalto caucho es fundamental conocer bien el procedimiento, optimizando el tiempo de su diseño.

Luego, en referencia a la etapa de colocación en terreno del asfalto se debe tener presente el tiempo de digestión del asfalto con caucho, que en esta investigación se establece en 90 minutos, lo cual no fue un problema mayor, ya que el tiempo de traslado del asfalto desde la planta en general supera los 90 minutos. No obstante, en futuros tramos, hay que tener en cuenta esta restricción, puesto que la planta puede encontrarse en un sitio más cercano al lugar a asfaltar. Así los otros asfaltos modificados tienen dicha ventaja ya que su proceso de modificación se realiza en planta y no requiere digestión.

El asfalto modificado con polvo de caucho es casi dos veces más rígido que los asfaltos multigrado y modificado con polímeros. Se observa que el asfalto modificado con polímeros tiene un excelente rendimiento a fatiga. Se observa que el asfalto con caucho tiene un comportamiento a fatiga levemente superior al asfalto tradicional registrado en investigaciones previas, pero está muy por debajo de los resultados obtenidos para asfaltos modificados con polímeros. En consecuencia, se

tiene al asfalto con caucho como una solución realizable, sin mayores costos para la obra, con un comportamiento satisfactorio a los deterioros del pavimento y principalmente, amigable con el medio ambiente. En contrapartida el asfalto multigrado posee un rendimiento a la fatiga prácticamente aleatorio.

Finalmente, en terreno, después de dos años de dado el tránsito en el tramo de prueba, no se observan mayores diferencias entre los distintos asfaltos modificados, lo cual está dentro de lo esperado, debido a que el deterioro por ahuellamiento (que podría verse manifestado en los primeros años de vida) en los tres casos se considera satisfactorio.

Conclusiones específicas

- Debido a las diferentes virtudes que entrega el asfalto con caucho y el asfalto modificado con polímeros, es importante clasificar el tipo de ruta, para utilizar el asfalto que se acomode de forma ideal a las necesidades.
- Se debe seguir rigurosamente el procedimiento de diseño, tanto para la dosificación como para la fabricación en planta de la mezcla de asfalto con caucho por vía seca, puesto que, al intentarse otros métodos de incorporación, se pudo comprobar lo sensible que es la calidad de la mezcla ante un proceder distinto a los pasos establecidos. Por ende, es trascendental tener el “know how” al utilizar este tipo de asfalto.
- Se sugiere que debido a las diferencias encontradas en los ensayos de desempeño entre las diferentes mezclas en caliente estudiadas, que no son cubiertas por los ensayos tradicionales de tipo Marshall, se hace necesaria la incorporación de ensayos de performance (tanto fatiga como ahuellamiento) en el diseño de los pavimentos.
- Para realizar en laboratorio los ensayos de comportamiento aplicados, se debe estudiar una rutina de compactación antes de hacer las probetas para ensayar, y así lograr la compactación adecuada; especialmente en caso de ocupar mezcla extraída de terreno, puesto que tiene un envejecimiento primario por el traslado desde planta y produce una variación con las rutinas que habitualmente se ocupan para las mezclas producidas en laboratorio, tanto para la confección de probetas usando el compactador giratorio (usado en el ensaye de ahuellamiento), como para el compactador de rodillo (usado en el ensaye de fatiga).

Recomendaciones

Se entregan recomendaciones tanto para investigaciones futuras como para el uso en terreno de los asfaltos estudiados.

- Se debe continuar con el seguimiento de los tramos de prueba, esta información es muy importante para comparar con los ensayos realizados en laboratorio.
- Será conveniente en el futuro realizar una investigación sobre fatiga utilizando mezcla asfáltica confeccionada en laboratorio, para comparar con los resultados entregados con mezcla fabricada en planta. Además, se pueden estudiar otros tipos de asfaltos modificados.
- El control del tiempo de digestión en terreno es un desafío para la incorporación de asfalto caucho por vía seca. En esta memoria se utilizó una planta asfáltica discontinua, donde este control pudo realizarse de mejor manera.
- Se recomienda realizar un estudio económico sobre la utilización de los diversos asfaltos modificados, incluyendo costos iniciales y costos de mantenimiento, donde se pueda comparar el beneficio a largo plazo de usar cada tipo de mezcla.
- Realizar mediciones de nivel de ruido en el tramo de prueba, para así comprobar en la realidad nacional el hecho que el asfalto con caucho genera niveles de ruido por rodadura menores que los otros pavimentos.

Referencias

- [1] Ministerio de Obras Públicas, Distribución de la Red Vial Nacional, 18 Mayo 2017. [En línea]. <<http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/gestionvial/Paginas/Informesyestudios.aspx>> [Consulta: 18 Mayo 2017].
- [2] Ley N° 20.920, Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, 1 de Junio de 2016.
- [3] Diario El Confidencial, Incendio vertedero de Sesena. [En línea] <http://www.elconfidencial.com/espana/2016-05-13/incendio-neumaticos-sesena_1199407/> . [Consulta: 21 Mayo 2017].
- [4] DELGADILLO Sturla, Rodrigo «Clases de pregrado curso: Laboratorio Vial,» de *Departamento de Obras Civiles UTFSM*, Valparaíso, 2014.
- [5] RONDÓN Quintana,H. Mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho de llanta. En VI jornadas de pavimento y mantenimiento vial (2011,Colombia) Bogotá, 2011.
- [6] Fundación Eroski. Destilación fraccionada del petróleo [En línea] <http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2005/10/31/147662.php>. [Consulta: 23 Junio 2017].
- [7] NAVARRO Dupré, Nicole. Confección y Seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional mediante vía seca. Memoria (Ing. Civil), Santiago, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, 2013.
- [8] BUTZ,Thorsten, MULLER, Johan y RIEBESEHL, Gerhard, Innovative method for producing crumbed rubber modified asphalt. En: 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress (2012, Turquía) Estambul,2012.
- [9] URIBE Olivares, Rodrigo. Implementación del método de ensaye de fatiga mediante el equipo viga de cuatro puntos. Memoria (Ing. Civil). Santiago, Universidad Central de Chile, Facultad de Ingeniería, 2013.
- [10] JORQUERA Rivas, Claudio y PEÑALOZA Navarro, Andrea. Estudio comparativo de mezclas asfálticas modificadas versus mezcla asfáltica en caliente con polvo de caucho mediante vía seca. Memoria (Ing. Civil) Santiago, USACH, Departamento de Obras Civiles, 2013.
- [11] SEGOVIA Airaudó, Raul. Estudio del efecto de la variación en la granulometría del caucho en mezclas asfálticas por vía seca. Memoria (Ing. Civil). Santiago, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, 2007.
- [12] LOYOLA Andrade, Camila. Resistencia al ahuellamiento de mezclas superpave mediante ensayos de rueda de hamburgo y flow number. Memoria (Construcción Civil). Valparaíso, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, 2016.

- [13] MARIN Gaete, Esteban. Caracterización del desempeño a fatiga mediante el enfoque fenomenológico y de disipación de energía de mezclas asfálticas chilenas. Tesis (Ing. Civil). Valparaíso, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, 2013.
- [14] PACHECO Sepúlveda, Giselle. Ensayo de fatiga en mezcla asfáltica IV-A-12 modificada, utilizada en pista de prueba. Memoria (Construcción Civil). Valparaíso, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, 2015.
- [15] RODRIGUEZ, Ana María. Asphalt rubber mixtures with warm mix asphalt additives. Tesis (Máster en Sistemas de Ingeniería Civil). Madrid. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puentes. 2015.
- [16] RAMIREZ Palma, Náyade. Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante vía seca. Memoria (Ing. Civil). Santiago, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, 2006.
- [17] GRUAS I Pauls, Josep. Efecto de la utilización de mezclas bituminosas con polvo de caucho sobre las características funcionales del pavimento. Tesina de especialitat. Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals y Ports de Barcelona, 2009.
- [18] ROCO Victor, FUENTES, Claudio y VALVERDE, Sergio. Evaluación de la resistencia al deslizamiento en pavimentos chilenos. En: 6° Congreso Internacional PROVIAL, (2002, Chile), Santiago, 2002.

Anexo A: Resultados ensaye de fatiga, viga de cuatro puntos

Resultados de ensaye de fatiga con viga de cuatro puntos. Se muestran los resultados de interés a medida que el ensayo progresa, entregando los valores de ciclos de carga, % de rigidez inicial, rigidez [MPa], deformación unitaria [$\mu\epsilon$], esfuerzo [kPa], carga [N], deformación [mm], energía disipada [MJ/m^3], energía disipada acumulada [MJ/m^3], ángulo de fase [$^\circ$], Temperatura 1 [$^\circ\text{C}$], Temperatura 2 [$^\circ\text{C}$], deformación unitaria media [strain] y tiempo [s].

- Asfalto con polímeros

Tabla A - 1: Resultados de fatiga, muestra de asfalto con polímeros

Polimero	Cycle	% Initial Stiffness	Stiffness (MPa)	Micro Strain	Stress (kPa)	Load (N)	Deformation (mm)	Dissipated Energy	Cumulative Diss	Phase Angle ($^\circ$)	RTD#1 ($^\circ\text{C}$)	RTD#2 ($^\circ\text{C}$)	Mean Strain	Elapsed Time (s)
600 ustrain	100	100	2057,56787	606,26532	1247,43201	540,072632	0,326998	0,000321	0,013966	32,669189	20,766144	20,273581	2,98E-10	10
600 ustrain	1000	71,588081	1474,92688	600,323914	885,433838	381,323761	0,323794	0,000255	0,268584	37,716202	20,714766	20,173382	2,06E-09	100
600 ustrain	2500	50,033546	1030,92517	600,559143	619,131531	264,097992	0,323921	0,000181	0,598856	38,243618	20,663389	20,30221	-1,66E-09	250
500 ustrain	100	100	2082,36035	506,043182	1053,76416	450,136108	0,276264	0,000221	0,010692	31,895582	20,317755	20,073181	-6,98E-10	10
500 ustrain	1000	79,472084	1653,64685	501,161133	828,74353	352,855957	0,273599	0,000194	0,192892	36,583019	20,233683	19,944353	-3,13E-09	100
500 ustrain	7900	50,586365	1050,97339	501,800415	527,378906	222,030884	0,273948	0,000129	1,276112	38,332211	20,275719	20,159067	3,75E-09	790
400 ustrain	100	100	2264,53272	401,235504	908,610962	393,56311	0,214265	0,000144	0,007533	30,23827	20,15428	19,930038	-1,25E-09	10
400 ustrain	1000	84,595871	1917,44605	399,393616	765,815674	331,006409	0,213282	0,000133	0,132464	33,744991	20,149609	20,058867	-1,99E-09	100
400 ustrain	10000	63,040337	1428,89905	399,868927	571,372375	245,602966	0,213536	0,000105	1,174418	35,95356	20,331766	20,111353	-5,68E-10	1000
400 ustrain	23500	50,959293	1156,59815	399,631287	462,21283	197,642853	0,213409	8,69E-05	2,467748	36,818684	20,322426	20,154295	-2,95E-10	2350
300 ustrain	100	100	2404,09033	298,327179	717,205505	315,956543	0,159311	8,05E-05	0,004655	28,625223	20,373804	20,326067	-1,19E-09	10
300 ustrain	1000	89,184395	2130,00977	300,347321	639,742798	281,414398	0,16039	7,82E-05	0,076416	31,207396	20,359791	20,111353	-2,23E-09	100
300 ustrain	10000	76,93222	1842,25122	299,693756	552,111206	242,339142	0,160041	7,10E-05	0,744766	33,130341	20,308413	20,130438	3,32E-09	1000
300 ustrain	100000	51,678822	1235,93005	300,466156	371,355133	161,559418	0,160453	4,94E-05	6,038139	34,348701	20,471889	20,221096	2,32E-09	10000
300 ustrain	111000	50,210934	1200,91711	299,574951	359,764679	156,391693	0,159977	4,78E-05	6,580184	34,383686	20,429852	20,216324	-2,91E-09	11100

- Asfalto con caucho

Tabla A - 2: Resultados de fatiga, muestra de asfalto con caucho

Asfalto caucho	Cycle	% Initial Stiffness	Stiffness (MPa)	Micro Strain	Stress (kPa)	Load (N)	Deformation (mm)	Dissipated Energy	Cumulative Diss	Phase Angle ($^\circ$)	RTD#1 ($^\circ\text{C}$)	RTD#2 ($^\circ\text{C}$)	Mean Strain	Elapsed Time (s)
600 ustrain	100	100	5104,66895	536,013367	2736,17065	1158,74915	0,292033	0,000416	0,014328	21,195234	20,364462	19,982523	9,69E-10	10
600 ustrain	1000	60,024864	3054,76367	601,995911	1838,9552	775,249512	0,327982	0,000425	0,446142	29,249258	20,345779	20,00161	4,00E-10	100
600 ustrain	1900	49,981384	2550,41748	601,529968	1534,15259	645,240417	0,327728	0,000366	0,800201	30,372746	20,336437	20,073181	6,45E-10	190
500 ustrain	100	100	4928,2207	465,795807	2295,54443	995,013855	0,252245	0,000303	0,011106	21,130713	20,322426	19,949123	4,62E-10	10
500 ustrain	1000	75,74115	3728,07861	500,07135	1864,30542	806,437195	0,270806	0,000341	0,323516	27,716257	20,229012	19,97298	-1,49E-09	100
500 ustrain	9800	50,420151	2484,81616	500,188568	1242,87671	534,995605	0,27087	0,00024	2,730103	29,377497	20,495243	20,316525	-6,33E-10	980
400 ustrain	100	100	5316,21143	386,563538	2055,05347	886,219604	0,20976	0,000217	0,009007	20,347063	20,373804	19,982523	2,11E-09	10
400 ustrain	1000	77,592522	4120,31934	400,480072	1650,10596	710,244995	0,217311	0,000219	0,214905	24,92589	20,28973	20,00161	-1,56E-09	100
400 ustrain	7600	50,017673	2659,04541	400,4216	1064,73914	456,119781	0,21728	0,000162	1,464061	28,939814	20,546619	20,407181	4,18E-09	760
400 ustrain	100	100	6711,03125	373,465637	2506,33936	1087,57959	0,202653	0,00021	0,007962	16,587315	20,074877	19,953896	-8,48E-10	10
400 ustrain	1000	81,471245	5474,42627	400,538513	2192,71875	950,498901	0,217343	0,000277	0,249486	23,681873	20,037512	19,896639	8,94E-10	100
400 ustrain	10000	52,479828	3538,5332	400,363159	1416,69836	611,876831	0,217248	0,000205	2,373036	27,40901	20,229012	20,130438	2,46E-09	1000
400 ustrain	11000	50,591068	3408,42334	399,36911	1361,21899	587,670166	0,216709	0,000197	2,57304	27,442869	20,257036	20,159067	1,13E-09	1100
300 ustrain	100	100	5346,29785	298,736755	1597,13562	701,722778	0,160485	0,000123	0,005677	19,163553	20,364462	20,039782	-2,44E-10	10
300 ustrain	1000	84,338051	4502,15234	300,744873	1353,99915	594,197815	0,161564	0,000124	0,118932	22,8375	20,308413	20,025467	-1,71E-09	100
300 ustrain	10000	62,918175	3363,92481	299,799866	1008,50421	441,432556	0,161056	0,000106	1,13793	26,478117	20,383144	20,144753	5,52E-10	1000
300 ustrain	26000	50,009991	2673,6853	300,390472	803,149597	350,589386	0,161373	8,89E-05	2,681067	27,964142	20,383144	20,192467	2,01E-09	2600
200 ustrain	100	100	7669,81641	198,573563	1523,02271	656,754517	0,107751	5,87E-05	0,002884	14,296608	19,477024	19,285896	9,69E-10	10
200 ustrain	1000	91,531502	7037,71436	199,450653	1403,67676	605,077271	0,108227	6,27E-05	0,058433	16,569759	19,63583	19,596039	1,85E-09	100
200 ustrain	10000	79,480286	6082,80664	199,743027	1214,99817	523,390869	0,108386	6,35E-05	0,629574	19,46146	20,817522	20,450125	1,72E-10	1000
200 ustrain	340000	58,223103	4476,34766	199,976913	895,166199	384,950226	0,108513	5,85E-05	20,456127	24,581547	20,35512	20,125668	-1,65E-10	34000

- Asfalto multigrado

Tabla A - 3: Resultados de fatiga, muestra de asfalto multigrado

Multigrado	Cycle	% Initial Stiffness	Stiffness (MPa)	Micro Strain	Stress (kPa)	Load (N)	Deformation (mm)	Dissipated Energy	Cumulative Diss	Phase Angle (°)	RTD#1 (°C)	RTD#2 (°C)	Mean Strain	Elapsed Time (s)
600 ustrain	100	100	3450,7312	582,160217	2008,8783	861,831543	0,319764	0,000291	0,010462	18,444029	20,583986	20,316525	1,57E-09	10
600 ustrain	413	49,777813	1706,93201	608,096924	1037,9801	440,072632	0,33401	0,000191	0,089832	22,623104	20,574644	20,321295	1,51E-09	41,299999
500 ustrain	100	100	2993,90259	500,84201	1499,47205	638,712769	0,275661	0,000228	0,009711	22,709379	20,551291	20,340382	1,09E-09	10
500 ustrain	1000	69,064484	2063,05444	501,072601	1033,74011	437,987427	0,275788	0,000189	0,195494	27,6511	20,565304	20,330837	5,82E-10	100
500 ustrain	3500	49,978683	1495,6792	500,784332	749,012695	315,231262	0,275629	0,000146	0,605016	29,71032	20,509254	20,283123	-9,21E-10	350
400 ustrain	100	100	3557,09839	399,33139	1420,46106	580,145203	0,223911	0,000168	0,007909	22,175964	20,257036	20,106581	2,03E-09	10
400 ustrain	1000	75,773239	2704,65772	400,349945	1082,80945	440,797913	0,224482	0,000153	0,153325	26,705309	20,243023	20,073181	3,06E-09	100
400 ustrain	3100	50,219276	1786,87952	400,293335	715,27594	288,939331	0,22445	0,000106	0,428693	28,181986	20,238352	20,197239	1,39E-09	310
300 ustrain	100	100	3183,97241	301,380981	959,588684	398,096191	0,167592	9,13E-05	0,005166	23,703382	20,429852	20,292667	1,27E-09	10
300 ustrain	1000	73,496254	2338,97925	299,897491	701,453918	289,75531	0,166767	7,47E-05	0,078776	26,872997	20,443865	20,311752	3,09E-09	100
300 ustrain	3900	50,209541	1593,5863	300,18277	478,367126	196,010925	0,166926	5,24E-05	0,255926	27,676334	20,504583	20,383324	6,70E-10	390
300 ustrain	100	100	3400,48804	302,970093	1030,24622	429,102539	0,167783	7,42E-05	0,003905	17,628887	20,345779	19,982523	1,04E-09	10
300 ustrain	1000	64,467751	2185,37036	300,048126	655,716309	271,260254	0,166164	5,46E-05	0,059096	20,682512	20,341108	20,020695	-1,17E-09	100
300 ustrain	2700	50,454067	1716,23731	299,81897	514,560486	211,786102	0,166037	4,62E-05	0,143059	22,414951	20,313084	20,13998	-1,12E-09	270

Anexo B: Resultados de ensayos para asfalto modificado con caucho, usando un método propuesto para utilizar planta continua

El método de diseño para mezclas modificadas con polvo de caucho incorporado en 5.402 del M.C.-V.5, no permite el uso de la planta continua con la cual la empresa ha confeccionado los tramos de asfalto multigrado y modificado con polímeros, puesto que el calentamiento de los agregados pétreos se realiza a través de la aplicación de fuego de forma directa, siendo el paso inmediatamente posterior el mezclado de los agregados con el ligante, eliminando la posibilidad de mezclar y homogeneizar los agregados pétreos con el caucho previamente, como se exige en el método por vía seca.

Ante esta situación, se opta por analizar en laboratorio el procedimiento propuesto por la empresa, que consiste en incorporar el caucho en frío a los agregados ya calientes, e inmediatamente después mezclar con el cemento asfáltico. Se estudia este método usando el ensayo de sensibilidad al agua, el cual permite examinar la completa digestión de la mezcla asfáltica con asfalto con caucho.

Los resultados se presentan a continuación.

Tabla B - 1: Sensibilidad al agua, para asfalto con caucho realizado en planta continua

Probetas	Condición	Estabilidad	Promedio	ITSR [%]
1	Húmedas	8940	9335	67,2
2		8986		
3		10078		
4	Secas	14248	13898	
5		14636		
6		12810		

Tabla B - 2: Parámetros Marshall para asfalto con caucho realizado en planta continua

% Asfalto	5,8
G	2324
Estabilidad	15682
Fluidez	19

Considerando los resultados de ITSr (mínimo 85%), se determina que este método propuesto no logra satisfacer las condiciones mínimas de digestión del caucho, provocando sólo una mezcla de baja calidad. Por lo tanto, se rechaza el uso de la planta asfáltica continua en la confección del asfalto con caucho.

Anexo C: Dosificación Marshall de asfalto multigrado

La dosificación de asfalto multigrado se realiza a través del método Marshall expuesto en el Manual de Carreteras, generando los siguientes resultados.

Tabla C - 1: Granulometría agregados pétreos para mezcla asfáltica multigrado

Granulometría			Banda IV-A-12	
Malla	mm	% pasa	Banda Inferior	Banda Superior
3/4	20	100	100	100
1/2	12,5	86	80	95
3/8	10	73	70	85
nº4	5	53	43	58
nº8	1,5	35	28	42
nº30	0,63	15	13	24
nº50	0,315	9	8	17
nº100	0,16	6	6	12
nº200	0,08	4	4	8

Tabla C - 2: Diseño Marshall de mezcla asfáltica multigrado

% ref. agregado	%	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Densidad	kg/m ³	2325	2336	2348	2338	2321
DMM	kg/m ³	2523	2505	2487	2470	2453
V.A	%	7,9	6,8	5,6	5,3	5,4
V.A.M.	%	17,6	17,6	17,5	18,3	19,3
Huecos llenos	%	55,2	61,6	68,2	70,8	72,0
Fluencia	0,25 mm	8,3	9,0	10,3	11,3	12,7
Estabilidad	N	9515	10635	11735	9988	9288

Tabla C - 3: Determinación contenido óptimo de asfalto multigrado

Porcentaje de asfalto para máxima densidad	5,5%
Porcentaje de asfalto para máxima estabilidad	5,4%
Porcentaje de asfalto para 5 % de vacíos de aire	5,6%
Contenido óptimo de asfalto	5,5%

En conclusión, se permite en terreno tener un porcentaje de asfalto de un $5,5\% \pm 0,3$ [%] con respecto al agregado.

Anexo D: Dosificación Marshall de asfalto modificado con polímeros

La dosificación de asfalto multigrado se realiza a través del método Marshall expuesto en el Manual de Carreteras, entregando los siguientes resultados.

Tabla D - 1: Granulometría agregados pétreos para mezcla asfáltica modificada con polímeros

Granulometría			Banda IV-A-12	
Malla	mm	% pasa	Banda Inferior	Banda Superior
3/4	20	100	100	100
1/2	12,5	86	80	95
3/8	10	73	70	85
nº4	5	53	43	58
nº8	1,5	35	28	42
nº30	0,63	15	13	24
nº50	0,315	9	8	17
nº100	0,16	6	6	12
nº200	0,08	4	4	8

Tabla D - 2: Diseño Marshall de mezcla asfáltica modificada con polímeros

% ref. agregado	%	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Densidad	kg/m3	2332	2334	2349	2338	2326
DMM	kg/m3	2523	2505	2487	2470	2453
V.A	%	7,6	6,4	5,6	5,4	5,2
V.A.M.	%	17,3	17,3	17,5	18,3	19,1
Huecos llenos	%	56,3	62,9	68,2	70,8	72,8
Fluencia	0,25 mm	8,3	9,7	11,3	12,7	13,3
Estabilidad	N	9105	9690	10109	9504	8886

Tabla D - 3: Contenido óptimo de asfalto, para mezcla asfáltica modificada con polímeros

Porcentaje de asfalto para máxima densidad	5,4%
Porcentaje de asfalto para máxima estabilidad	5,5%
Porcentaje de asfalto para 5 % de vacíos de aire	5,6%
Contenido óptimo de asfalto	5,5%

Finalmente, se permite usar un contenido de asfalto de un $5,5 \pm 0,3$ [%] con respecto al agregado.

Anexo E: Resultados ensayo módulo de rigidez

Se entregan los resultados detallados de módulo de rigidez según UNE-EN 12697-26 (2012), para cada probeta, en el caso de mezclas de terreno y mezcla elaborada en laboratorio.

Tabla E - 1: Módulo de rigidez de asfalto con caucho, mezcla extraída en terreno

Probeta	MR a 15º	MR a 25º
1	8797	4092
2	9709	4469
3	9741	4464
4	8056	3701
5	8148	3703
6	8159	3523
7	8027	3703
8	8401	3640
9	8435	3649

Tabla E - 2: Módulos de rigidez de asfalto multigrado, mezcla extraída en terreno

Probeta	MR a 15º	MR a 25º
1	6474	2669
2	5639	2143
3	6611	2982
4	6314	2690
5	5329	2337
6	7010	2938
7	5626	1971
8	5843	2196
9	5814	2161

Tabla E - 3: Módulos de rigidez de asfalto modificado con polímeros, mezcla extraída en terreno

Probeta	MR a 15º	MR a 25º
1	3354	1312
2	4017	1556
3	3787	1343
4	3471	1227
5	3278	1281
6	3463	1278
7	2603	1011
8	2723	1047
9	3157	2177

Tabla E - 4: Módulos de rigidez de asfalto con caucho, mezcla confeccionada en laboratorio

Probeta	MR a 15ºC	MR A 25ºC
1	8497	3257
2	8647	3141
3	8144	3205
4	8082	3073
5	8128	3198
6	7317	2916
7	8582	3590
8	7853	3149
9	7693	3835

Tabla E - 5: Módulos de rigidez de asfalto multigrado, mezcla confeccionada en laboratorio

Probeta	MR a 15º	MR a 25º
1	4512	1537
2	4052	1361
3	3593	1244
4	4069	1322
5	4287	1406
6	4252	1469
7	4156	1399
8	4438	1553
9	4368	1351

Tabla E - 6: Módulos de rigidez de asfalto modificado con polímeros, mezcla confeccionada en laboratorio

Probeta	MR a 15º	MR a 25º
1	3218	1113
2	3366	1218
3	4051	1524
4	4180	1451
5	4041	1498
6	3913	1527
7	4014	1491
8	4541	1711
9	4225	1459

Anexo F: Resultados péndulo británico

Se mide la resistencia al deslizamiento mediante el péndulo británico según 8.502.16 del M.C.-V.8.

La simbología usada remite a lo siguiente:

- F.A.: Factor de ajuste por temperatura.
- BPN: British Pendulum Number.
- BPNa: British Pendulum Number, ajustado por temperatura ($BPN \cdot FA$)
- RD: Resistencia al deslizamiento.
- HE: Huella Externa.
- HI: Huella Interna.
- T°: Temperatura del agua en °C.

Se controla el deslizamiento por tramo, y por pista, consiguiendo los siguientes resultados.

Tabla F - 1: Deslizamiento para pista 1, mezcla de asfalto con caucho

Km	Temp. Agua °C	F.A	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Promedio BPN	Corrección T° BPNa	Valor RD (Fricción)	Observaciones (Huella)
0,310	18,7	0,993	68	66	66	65	65	66,0	65,6	0,66	HE
0,310	18,7	0,993	67	67	69	68	67	67,6	67,1	0,67	HI
0,400	19,2	0,996	64	64	65	64	64	64,2	63,9	0,64	HE
0,400	19,2	0,996	65	65	64	64	64	64,4	64,1	0,64	HI
0,500	19,2	0,996	67	66	65	65	65	65,6	65,3	0,65	HE
0,500	19,2	0,996	55	56	56	57	57	56,2	56,0	0,56	HI
0,600	19,2	0,996	64	66	66	66	65	65,4	65,1	0,65	HE
0,600	19,2	0,996	70	69	70	70	71	70,0	69,7	0,70	HI
0,700	19,2	0,996	65	64	65	64	65	64,6	64,3	0,64	HE
0,700	19,2	0,996	63	62	64	64	63	63,2	62,9	0,63	HI
0,790	20,1	1,001	60	59	60	61	60	60,0	60,0	0,60	HE
0,790	20,1	1,001	64	64	65	65	63	64,2	64,2	0,64	HI

Tabla F - 2: Deslizamiento para pista 2, mezcla de asfalto con caucho

Km	Temp. Agua °C	F.A	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Promedio BPN	Corrección T° BPNa	Valor RD (Fricción)	Observaciones (Huella)
0,750	21,6	1,008	53	52	52	53	52	52,4	52,8	0,53	HE
0,750	21,6	1,008	61	60	60	59	59	59,8	60,3	0,60	HI
0,650	21,6	1,008	62	59	59	60	60	60,0	60,5	0,61	HE
0,650	21,6	1,008	61	60	61	59	59	60,0	60,5	0,61	HI
0,550	24,4	1,024	64	65	65	64	64	64,4	65,9	0,66	HE
0,550	24,4	1,024	63	62	62	62	62	62,2	63,7	0,64	HI
0,450	24,4	1,024	58	56	55	55	55	55,8	57,1	0,57	HE
0,450	24,4	1,024	62	60	60	61	60	60,6	62,0	0,62	HI
0,350	24,9	1,026	57	56	58	58	57	57,2	58,7	0,59	HE
0,350	24,9	1,026	56	57	57	58	58	57,2	58,7	0,59	HI

Tabla F - 3: Deslizamiento para pista 1, mezcla de asfalto multigrado

Km	Temp. Agua °C	F.A	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Promedio BPN	Corrección T° BPNa	Valor RD (Fricción)	Observaciones (Huella)
0,900	19,9	0,999	52	53	53	52	52	52,4	52,4	0,52	HE
0,900	19,9	0,999	56	55	54	55	54	54,8	54,8	0,55	HI
1,000	18,6	0,993	64	65	64	64	64	64,2	63,7	0,64	HE
1,000	18,6	0,993	62	61	61	61	62	61,4	61,0	0,61	HI
1,100	19,3	0,996	46	46	47	45	46	46,0	45,8	0,46	HE
1,100	19,5	0,997	52	54	53	54	54	53,4	53,3	0,53	HI
1,200	19,3	0,996	64	64	66	64	64	64,4	64,2	0,64	HE
1,200	19,3	0,996	65	65	64	63	63	64,0	63,8	0,64	HI
1,290	19,2	0,996	71	70	70	69	69	69,8	69,5	0,70	HE
1,290	19,2	0,996	70	71	71	70	70	70,4	70,1	0,70	HI

Tabla F - 4: Deslizamiento para pista 2, mezcla de asfalto multigrado

Km	Temp. Agua °C	F.A	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Promedio BPN	Corrección T° BPNa	Valor RD (Fricción)	Observaciones (Huella)
1,250	20,9	1,005	69	70	69	68	68	68,8	69,1	0,69	HE
1,250	20,9	1,005	59	59	58	57	59	58,4	58,7	0,59	HI
1,150	19,8	0,999	60	60	61	59	59	59,8	59,7	0,60	HE
1,150	19,8	0,999	59	60	60	59	60	59,6	59,5	0,60	HI
1,050	21,0	1,005	61	60	60	59	59	59,8	60,1	0,60	HE
1,050	20,9	1,005	53	52	52	53	54	52,8	53,1	0,53	HI
0,950	22,8	1,015	61	61	62	62	63	61,8	62,7	0,63	HE
0,950	22,8	1,015	55	55	54	55	54	54,6	55,4	0,55	HI
0,850	23,0	1,016	55	54	55	56	55	55,0	55,9	0,56	HE
0,850	23,0	1,016	61	60	59	59	59	59,6	60,6	0,61	HI

Tabla F - 5: Deslizamiento para pista 1, mezcla de asfalto modificado con polímeros

Km	Temp. Agua °C	F.A	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Promedio BPN	Corrección T° BPNa	Valor RD (Fricción)	Observaciones (Huella)
1,310	20,4	1,002	65	66	66	65	66	65,6	65,7	0,66	HE
1,310	20,4	1,002	63	62	62	64	64	63,0	63,1	0,63	HI
1,400	21,4	1,007	64	63	64	65	65	64,2	64,7	0,65	HE
1,400	21,4	1,007	58	59	58	57	59	58,2	58,6	0,59	HI
1,500	21,4	1,007	60	59	59	60	60	59,6	60,0	0,60	HE
1,500	21,4	1,007	60	60	61	63	63	61,4	61,9	0,62	HI
1,600	21,4	1,007	59	58	58	58	59	58,4	58,8	0,59	HE
1,600	21,4	1,007	60	60	61	61	61	60,6	61,0	0,61	HI
1,700	21,6	1,008	60	59	59	60	59	59,4	59,9	0,60	HE
1,700	21,6	1,008	55	55	53	54	53	54,0	54,5	0,54	HI
1,790	21,7	1,009	50	49	50	49	49	49,4	49,8	0,50	HE
1,790	21,7	1,009	51	50	49	49	50	49,8	50,2	0,50	HI

Tabla F - 6: Deslizamiento para pista 2, mezcla de asfalto modificado con polímeros

Km	Temp. Agua °C	F.A	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Promedio BPN	Corrección T° BPNa	Valor RD (Fricción)	Observaciones (Huella)
1,750	23,6	1,019	56	56	58	58	58	57,2	58,3	0,58	HE
1,750	23,6	1,019	48	49	50	50	49	49,2	50,1	0,50	HI
1,650	23,6	1,019	64	63	64	64	63	63,6	64,8	0,65	HE
1,650	23,6	1,019	52	52	52	53	52	52,2	53,2	0,53	HI
1,550	23,6	1,019	56	55	56	55	55	55,4	56,5	0,56	HE
1,550	23,6	1,019	57	56	57	57	56	56,6	57,7	0,58	HI
1,450	25,3	1,029	55	55	54	54	54	54,4	56,0	0,56	HE
1,450	25,3	1,029	56	57	55	55	55	55,6	57,2	0,57	HI
1,350	25,3	1,029	54	56	55	55	55	55,0	56,6	0,57	HE
1,350	25,3	1,029	55	57	58	58	57	57,0	58,6	0,59	HI

Anexo G: Medición de macrotextura

Se realiza la medición de la macrotextura a través de 8.502.14 del M.C.-V.8, en ambas pistas para todo el tramo de prueba. El detalle de los resultados se muestra a continuación.

Tabla G - 1: Macrotextura en pista 1, mezcla de asfalto con caucho

Km	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro 3 (cm)	Diámetro 4 (cm)	Diámetro 5 (cm)	Diámetro Prom. (cm)	MTD (mm)	Observaciones (Huella)
0,310	22,0	20,0	21,5	21,5	21,5	21,3	0,7	HE
0,310	21,0	20,0	20,0	19,5	20,4	20,2	0,8	HI
0,400	19,7	19,8	20,0	19,5	20,0	19,8	0,8	HE
0,400	20,0	19,5	20,0	20,0	19,5	19,8	0,8	HI
0,500	22,0	21,0	22,0	21,0	22,0	21,6	0,7	HE
0,500	20,0	20,0	20,5	19,5	21,0	20,2	0,8	HI
0,600	23,0	22,3	22,5	22,5	23,0	22,7	0,6	HE
0,600	22,5	20,5	21,3	21,5	22,5	21,7	0,7	HI
0,700	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	0,6	HE
0,700	20,0	21,0	19,5	20,5	19,5	20,1	0,8	HI
0,790	22,0	21,0	22,0	20,5	22,0	21,5	0,7	HE
0,790	20,0	20,0	19,5	19,5	20,5	19,9	0,8	HI

Tabla G - 2: Macrotextura en pista 2, mezcla de asfalto con caucho

Km	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro 3 (cm)	Diámetro 4 (cm)	Diámetro 5 (cm)	Diámetro Prom. (cm)	MTD (mm)	Observaciones (Huella)
0,750	25,0	25,0	24,5	24,0	24,5	24,6	0,5	HE
0,750	25,0	23,0	25,0	23,0	25,5	24,3	0,5	HI
0,650	26,0	26,0	25,0	26,5	26,0	25,9	0,5	HE
0,650	22,0	21,0	23,0	21,8	22,5	22,1	0,7	HI
0,550	24,0	23,5	24,5	23,5	24,0	23,9	0,6	HE
0,550	23,0	24,0	22,5	23,0	24,0	23,3	0,6	HI
0,450	23,5	23,0	23,0	23,5	23,0	23,2	0,6	HE
0,450	24,0	23,0	23,5	24,0	24,5	23,8	0,6	HI
0,350	25,0	23,5	25,0	25,0	25,0	24,7	0,5	HE
0,350	21,0	20,7	21,5	21,6	21,0	21,2	0,7	HI

Tabla G - 3: Macrotextura en pista 1, mezcla de asfalto multigrado

Km	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro 3 (cm)	Diámetro 4 (cm)	Diámetro 5 (cm)	Diámetro Prom. (cm)	MTD (mm)	Observaciones (Huella)
0,900	30,0	28,0	30,0	29,5	28,5	29,2	0,4	HE
0,900	26,0	26,0	25,5	27,0	25,0	25,9	0,5	HI
1,000	28,0	27,0	28,5	27,0	28,0	27,7	0,4	HE
1,000	27,5	23,0	26,0	25,0	25,0	25,3	0,5	HI
1,100	29,0	28,0	29,0	27,0	28,0	28,2	0,4	HE
1,100	26,5	25,5	25,5	26,0	26,0	25,9	0,5	HI
1,200	25,5	27,5	27,0	27,5	28,0	27,1	0,4	HE
1,200	25,5	24,0	26,0	24,0	25,0	24,9	0,5	HI
1,290	27,7	27,0	28,0	26,5	27,5	27,3	0,4	HE
1,290	27,0	25,5	25,5	26,6	27,0	26,3	0,5	HI

Tabla G - 4: Macrotextura en pista 2, mezcla de asfalto multigrado

Km	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro 3 (cm)	Diámetro 4 (cm)	Diámetro 5 (cm)	Diámetro Prom. (cm)	MTD (mm)	Observaciones (Huella)
1,250	30,0	30,0	31,0	31,0	30,0	30,4	0,3	HE
1,250	29,0	28,5	29,0	29,5	29,0	29,0	0,4	HI
1,150	31,0	30,0	31,0	31,0	31,0	30,8	0,3	HE
1,150	29,0	27,0	28,0	27,5	29,5	28,2	0,4	HI
1,050	32,0	31,0	30,0	31,5	32,0	31,3	0,3	HE
1,050	28,0	25,5	27,5	27,5	28,0	27,3	0,4	HI
0,950	28,5	28,5	28,5	28,0	29,0	28,5	0,4	HE
0,950	27,0	26,0	27,0	26,0	27,0	26,6	0,4	HI
0,850	32,5	31,0	32,0	32,0	32,0	31,9	0,3	HE
0,850	24,0	24,5	24,0	24,0	24,0	24,1	0,5	HI

Tabla G - 5: Macrotextura en pista 1, mezcla de asfalto modificado con polímeros

Km	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro 3 (cm)	Diámetro 4 (cm)	Diámetro 5 (cm)	Diámetro Prom. (cm)	MTD (mm)	Observaciones (Huella)
1,310	30,0	25,5	27,0	26,5	28,0	27,4	0,4	HE
1,310	25,0	25,0	21,5	24,5	25,0	24,2	0,5	HI
1,400	26,0	26,0	25,5	27,0	27,0	26,3	0,5	HE
1,400	23,0	22,0	23,0	22,5	23,0	22,7	0,6	HI
1,500	27,0	25,0	27,0	24,5	27,0	26,1	0,5	HE
1,500	23,0	22,0	23,0	22,0	23,0	22,6	0,6	HI
1,600	26,0	25,0	27,0	26,5	26,5	26,2	0,5	HE
1,600	23,5	23,0	22,0	22,0	23,0	22,7	0,6	HI
1,700	26,0	29,0	26,0	28,0	31,0	28,0	0,4	HE
1,700	23,0	25,0	23,0	24,5	23,0	23,7	0,6	HI
1,790	26,5	26,5	25,0	26,5	26,0	26,1	0,5	HE
1,790	25,0	23,5	24,5	24,0	25,0	24,4	0,5	HI

Tabla G - 6: Macrotextura en pista 2, mezcla de asfalto modificado con polímeros

Km	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro 3 (cm)	Diámetro 4 (cm)	Diámetro 5 (cm)	Diámetro Prom. (cm)	MTD (mm)	Observaciones (Huella)
1,750	25,50	27,00	25,00	29,00	26,00	26,50	0,5	HE
1,750	26,00	26,00	25,00	26,00	26,00	25,80	0,5	HI
1,650	29,90	28,00	28,80	28,00	28,50	28,60	0,4	HE
1,650	23,00	22,00	22,00	22,50	23,00	22,50	0,6	HI
1,550	27,00	26,00	26,00	26,50	27,00	26,50	0,5	HE
1,550	21,50	24,00	22,00	24,00	22,00	22,70	0,6	HI
1,450	28,00	29,90	30,00	30,00	28,00	29,20	0,4	HE
1,450	25,50	26,00	25,00	25,00	25,00	25,30	0,5	HI
1,350	28,00	29,00	28,00	27,00	29,00	28,20	0,4	HE
1,350	22,00	21,50	22,00	22,00	22,00	21,90	0,7	HI

Anexo H: Perfiles de ensaye de ahuellamiento

Se presentan los perfiles en detalle del ensaye de ahuellamiento con la Rueda de Hamburgo del LNV, en $x = 0$ [mm], se encuentra el eje donde se unen las dos probetas cortadas.

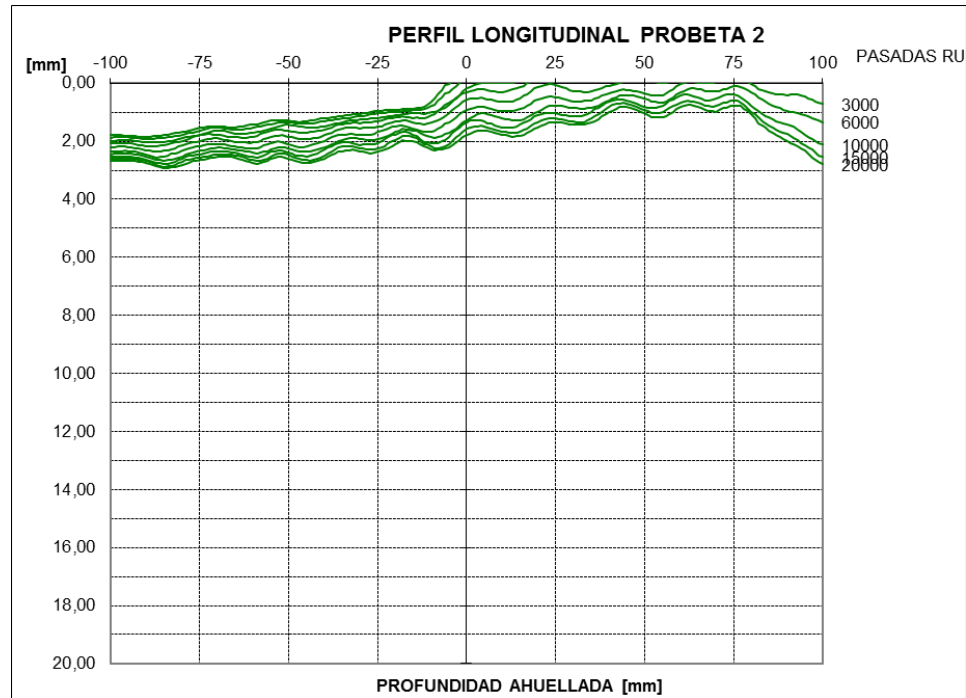


Figura H - 1: Perfil de ahuellamiento de mezcla de asfalto con caucho, extracción en terreno

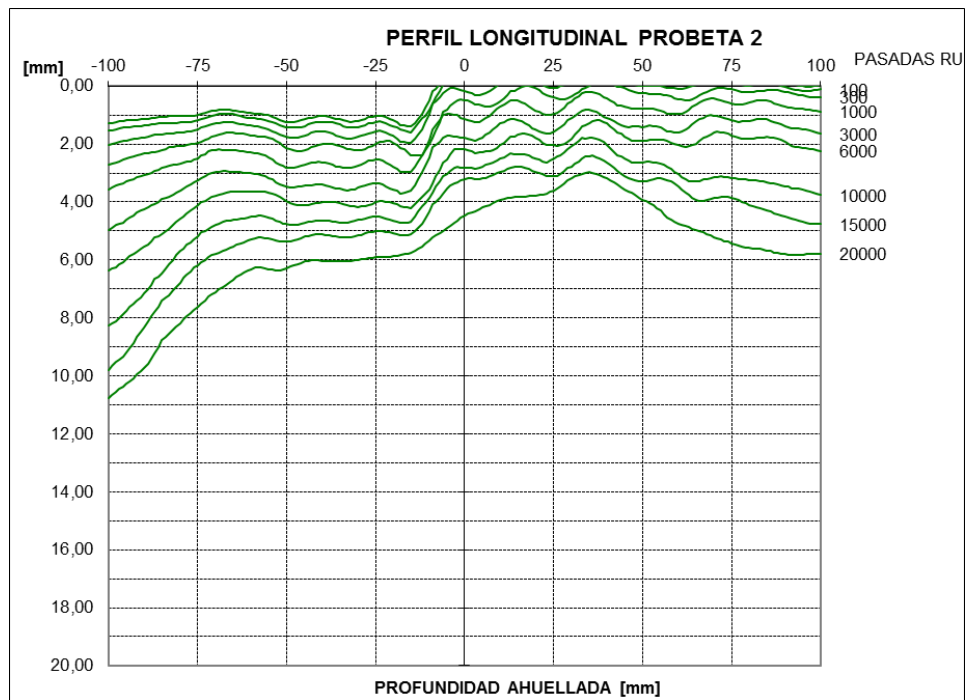


Figura H - 2: Perfil de ahuellamiento de mezcla de asfalto multigrado, extracción en terreno

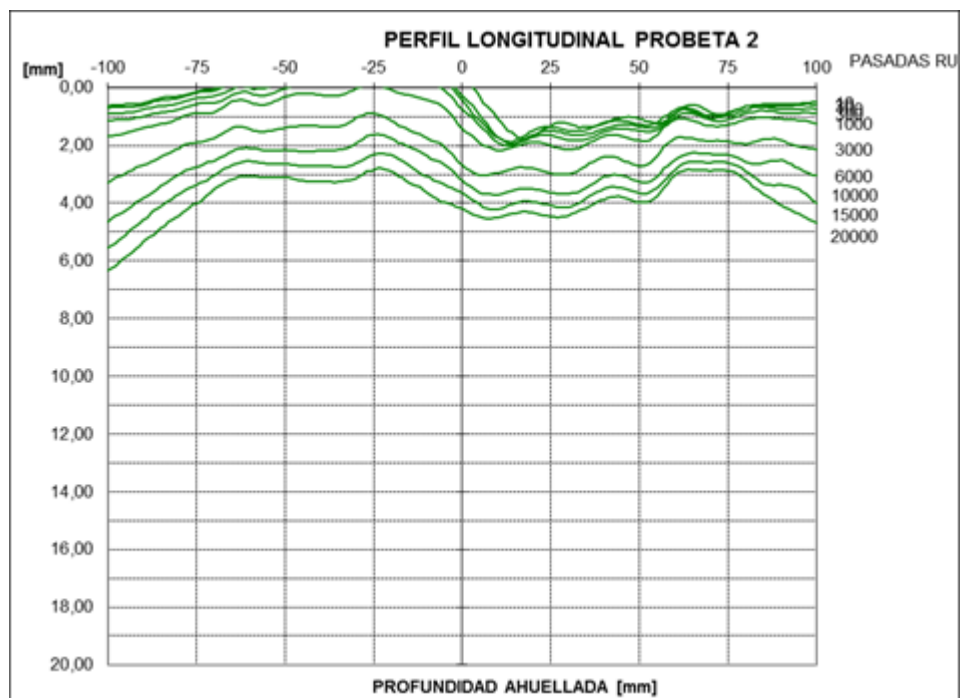


Figura H - 3: Perfil de ahuellamiento de mezcla de asfalto modificado con polímeros, extracción en terreno

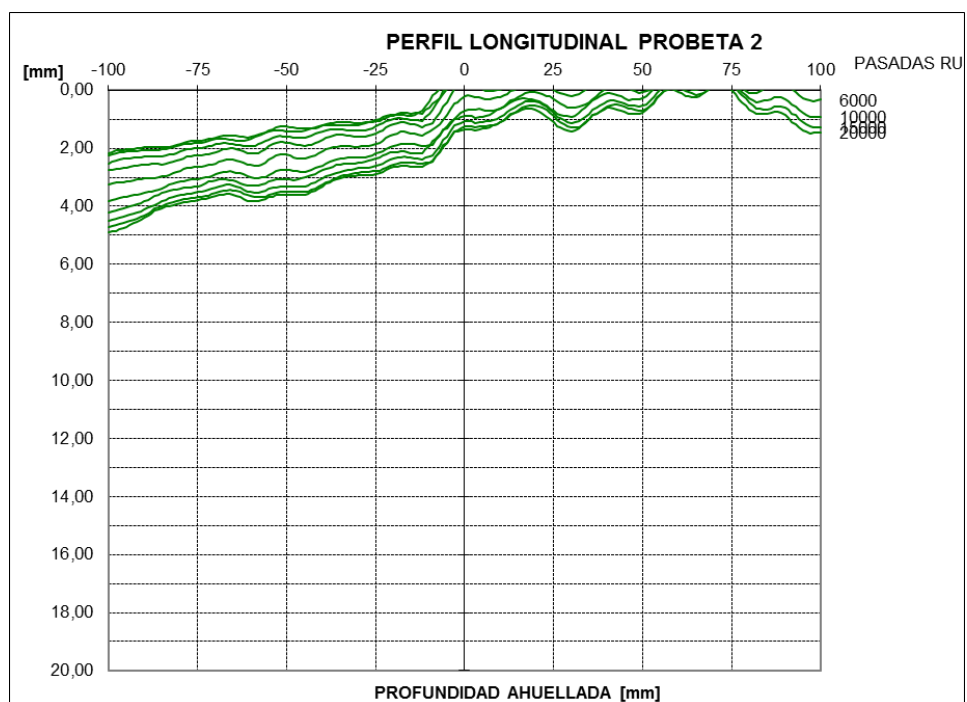


Figura H - 4: Perfil de ahuellamiento de mezcla de asfalto con caucho, confección en laboratorio

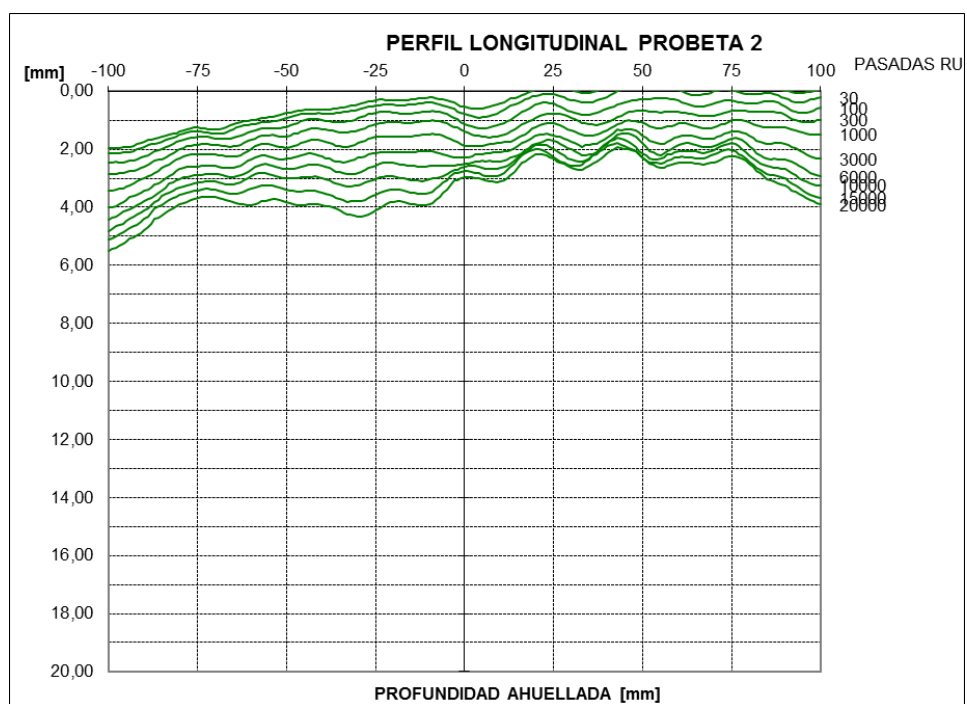


Figura H - 5: Perfil de ahuellamiento de mezcla de asfalto multigrado, confección en laboratorio

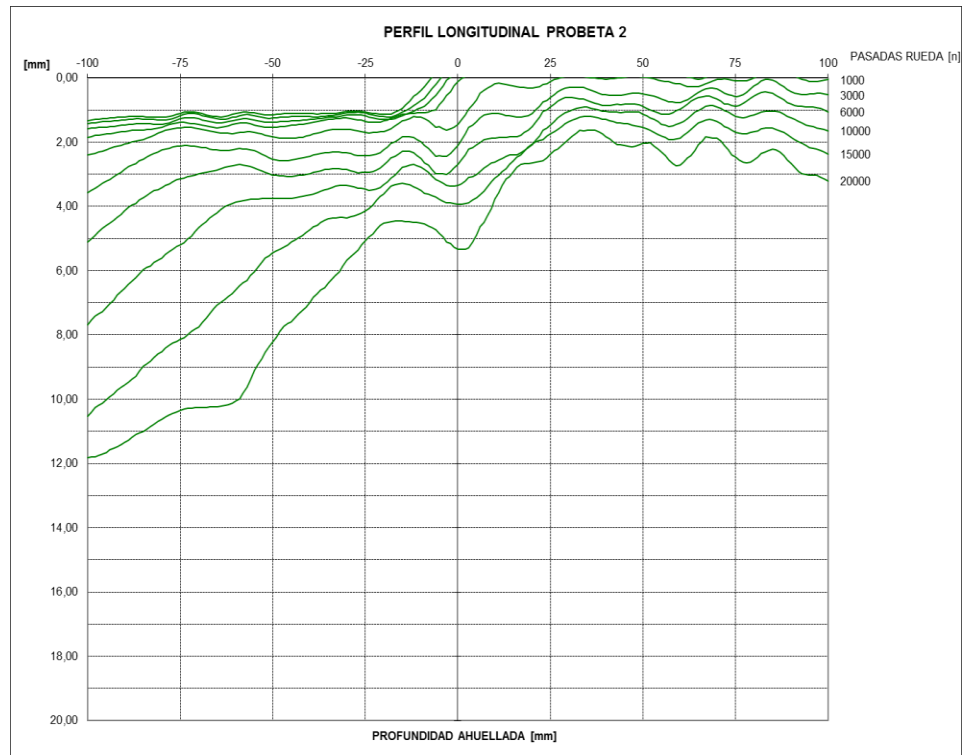


Figura H - 6: Perfil de ahuellamiento de mezcla de asfalto modificado con polímeros, confección en laboratorio

Anexo I: Características físicas de probetas usadas en ensaye de módulo.

Tabla I - 1: Probetas para ensaye de módulo, asfalto multigrado, extracción en terreno

Probeta	Diámetro	D prom	Altura		Alt prom	Masa Seca	Masa Sum	Msss	G	Estabilidad	Fluidez	MR a 15º	MR a 25º	% vacios
1	101,5	101,5	64,5	64,7	64,7	1144,9	656,9	1159,8	2276,6	10703	14	6474	2669	8,6
	101,5		64,9	64,7										
2	101,6	101,6	63,8	63,7	63,9	1136,7	648,8	1150,0	2268,0	10635	13	5639	2143	8,9
	101,6		64,0	64,1										
3	101,6	101,6	63,9	63,9	63,8	1145,5	656,6	1157,6	2286,4	11858	16	6611	2982	8,2
	101,6		63,9	63,5										
4	101,8	101,7	62,3	62,6	62,6	1142,8	653,7	1154,4	2282,4	12796	15	6314	2690	8,3
	101,7		62,6	62,8										
5	101,5	101,5	66,0	65,8	66,0	1145,3	649,9	1155,8	2263,9	10058	16	5329	2337	9,1
	101,5		66,0	66,2										
6	101,6	101,6	63,2	63,6	63,5	1141,2	652,2	1154,5	2271,9	12539	15	7010	2938	8,8
	101,6		63,9	63,4										
7	101,2	101,3	62,6	62,7	62,7	1137,9	650,5	1145	2301,1	10568	15	5626	1971	7,6
	101,3		62,8	62,9										
8	101,4	101,3	63,7	62,9	63,3	1140,7	654,3	1147,7	2311,9	10847	15	5843	2196	7,2
	101,3		63,2	63,4										
9	101,5	101,6	62,6	62,5	62,6	1144,5	656,4	1149,9	2319,1	11978	14	5814	2161	6,9
	101,6		62,7	62,8										

Tabla I - 2: Probetas para ensaye de módulo, asfalto modificado con polímeros, extracción en terreno

Probeta	Diámetro	D prom	Altura		Alt prom	Masa Seca	Masa Sum	Msss	G	Estabilidad	Fluidez	MR a 15º	MR a 25º	% vacíos
1	101,7	101,7	64,7	64,5	64,5	1141,0	653,6	1155,0	2275,5	10410	14	3354	1312	8,8
	101,7		64,6	64,4										
2	101,6	101,6	64,4	64,6	64,5	1137,8	650,0	1152,9	2262,5	10463	15	4017	1556	9,3
	101,6		64,6	64,3										
3	101,6	101,6	66,3	65,7	66,1	1145,9	657,3	1161,8	2271,4	10024	15	3787	1343	8,9
	101,6		66,3	66,0										
4	101,6	101,6	64,5	64,4	64,6	1143,0	657,3	1160,2	2272,8	9763	14	3471	1227	8,9
	101,6		64,7	64,6										
5	101,6	101,6	65,1	64,9	64,9	1143,0	655,5	1158	2274,6	9974	16	3278	1281	8,8
	101,6		64,9	64,7										
6	101,7	101,7	64,9	64,6	64,5	1144,9	656,6	1156,7	2289,3	11218	16	3463	1278	8,2
	101,7		64,2	64,3										
7	101,6	101,6	64,2	64,3	64,4	1136,4	652,4	1152,7	2271,4	12656	17	2603	1011	8,9
	101,6		64,3	64,7										
8	101,6	101,6	65,2	65,5	65,3	1144,9	648,9	1152,0	2275,7	10872	16	2723	1047	8,8
	101,5		65,2	65,3										
9	101,3	101,4	65,2	64,8	65,1	1145,8	658,3	1160,7	2280,7	10761	16	3157	2177	8,6
	101,5		64,8	65,4										

Tabla I - 3: Probetas para ensaye de módulo, asfalto modificado con polvo de caucho, extracción en terreno

Probeta	Densidad	DMM	Vacíos	Fluidez	Estabilidad	MR a 15º	MR a 25º	% vacíos
1	2328	2452	5	14	13503	8797	4092	5,2
2	2326		5,2	14	14624	9709	4469	5,3
3	2339		4,6	13	13617	9741	4464	4,7
4	2311		5,8	14	12942	8056	3701	5,9
5	2312		5,7	14	13409	8148	3703	5,8
6	2312		5,7	13	13159	8159	3523	5,8
7	2327		5,1	14	12899	8027	3703	5,2
8	2327		5,1	13	13363	8401	3640	5,2
9	2313		5,7	15	14249	8435	3649	5,8

Tabla I - 4: Probetas para ensaye de módulo, asfalto multigrado, fabricación en laboratorio

Probeta	Diámetro	D prom	Altura		Alt prom	Masa Seca	Masa Sum	Msss	G	MR a 15º	MR a 25º	Estabilidad	Fluidez	% vacíos
1	101,8	101,7	60,5	60,3	60,4	1145,4	661,3	1147,7	2354,9	4512	1537	12502	13	5,4
	101,7		60,3	60,4										
2	101,7	101,7	62,2	62,4	62,2	1147,7	661,1	1153,9	2328,9	4052	1361	8332	15	6,5
	101,7		62,0	62,1										
3	101,5	101,5	62,0	62,2	62,1	1143,5	658,3	1149,1	2329,9	3593	1244	9960	13	6,4
	101,5		62,1	62,3										
4	101,7	101,7	61,3	61,4	61,2	1141,4	656,5	1142,5	2348,6	4069	1322	9055	15	5,7
	101,7		61,1	60,9										
5	101,6	101,6	60,3	60,3	60,5	1141,2	659,1	1142,3	2361,8	4287	1406	11503	15	5,2
	101,6		60,7	60,6										
6	101,6	101,6	60,5	60,2	60,2	1138,4	658,3	1139,9	2363,8	4252	1469	11351	17	5,1
	101,6		60,0	60,1										
7	101,5	101,5	61,6	61,4	61,5	1139,6	656,1	1141,3	2348,7	4156	1399	10924	17	5,7
	101,5		61,2	61,8										
8	101,6	101,6	60,8	61,1	61,0	1141,9	658,1	1143,6	2352,0	4438	1553	9474	15	5,5
	101,6		60,9	61,2										
9	101,6	101,6	61,0	61,0	60,9	1142,7	660,2	1145,0	2357,1	4368	1351	11521	14	5,3
	101,6		60,7	60,9										

Tabla I - 5: Probetas para ensaye de módulo, asfalto modificado con polímeros, fabricación en laboratorio

Probeta	Diámetro	D prom	Altura		Alt prom	Masa Seca	Masa Sum	Msss	G	MR a 15º	MR a 25º	Estabilidad	Fluidez	% vacíos
1	101,9	101,8	62,6	62,5	62,6	1138,6	655,2	1143,5	2331,8	3218	1113	9395	15	6,5
	101,8		62,5	62,7										
2	101,8	101,7	63,1	62,9	62,5	1132,0	648,8	1135,2	2327,3	3366	1218	8973	17	6,7
	101,7		62,1	62,0										
3	101,8	101,8	60,7	60,8	60,8	1131,8	648,9	1134,8	2329,3	4051	1524	10009	16	6,6
	101,7		60,8	60,9										
4	101,7	101,7	61,5	61,9	61,7	1156,5	667,2	1158,5	2354,0	4180	1451	10649	17	5,6
	101,7		61,7	61,9										
5	101,7	101,7	60,7	60,7	60,6	1145,1	664	1148,9	2361,5	4041	1498	12491	18	5,3
	101,7		60,3	60,9										
6	101,7	101,6	60,9	60,6	60,6	1146,0	664,8	1149,8	2362,9	3913	1527	11628	15	5,3
	101,6		60,3	60,5										
7	101,7	101,6	60,6	61,0	60,9	1144,3	660,8	1146,9	2354,0	4014	1491	10458	16	5,6
	101,6		61,3	60,6										
8	101,6	101,6	60,8	61,0	60,6	1148,4	665,9	1150,4	2370,3	4541	1711	12272	16	5,0
	101,6		60,6	60,1										
9	101,6	101,6	62,6	62,1	62,1	1141,1	655,7	1144,3	2335,4	4225	1459	10279	16	6,4
	101,6		62,3	61,6										

**Tabla I - 6: Probetas para ensaye de módulo, asfalto modificado con polvo de caucho,
fabricación en laboratorio**

Probeta	Diámetro	D prom	Altura		Alt prom	Masa Seca	Masa Sum	Msss	G	MR a 15°C	MR A 25°C	Estabilidad	Fluidez	% vacíos
1	101,7	101,7	62,3	62,5	62,6	1154,1	663,1	1157,9	2332,5	8497	3257	15607	14	5,0
	101,7		63,0	62,7										
2	101,7	101,7	62,7	62,2	62,5	1153,1	657,8	1156,5	2312,2	8647	3141	13759	17	5,8
	101,7		62,2	62,8										
3	101,7	101,6	62,4	62,1	62,3	1147,4	658,0	1150,6	2329,3	8144	3205	12906	16	5,1
	101,6		62,2	62,5										
4	101,7	101,7	62,2	62,2	62,0	1147,8	658,6	1150,1	2335,3	8082	3073	13833	18	4,9
	101,7		61,7	61,9										
5	101,6	101,5	61,8	62,3	61,8	1151,8	666,6	1153,4	2366,1	8128	3198	14210	15	3,6
	101,5		61,8	61,5										
6	101,7	101,7	61,6	62,0	61,8	1145,1	658,6	1148,8	2336,0	7317	2916	12237	16	4,8
	101,7		61,6	62,0										
7	101,6	101,6	62,0	62,0	62,2	1145,8	658,1	1149,0	2334,1	8582	3590	13610	16	4,9
	101,6		62,4	62,4										
8	101,6	101,6	62,6	63,1	62,9	1145,0	652,6	1149,2	2305,7	7853	3149	12932	17	6,1
	101,5		63,1	62,7										
9	101,4	101,4	62,4	62,4	62,4	1153,7	663,5	1156,3	2341,1	7693	3835	13592	16	4,6
	101,4		62,5	62,4										

Anexo J: Características físicas de las probetas usadas en ensaye de ahuellamiento

Tabla J - 1: Probetas para ensaye de ahuellamiento, extracción en terreno

Probeta	P1	P2	M1	M2	AC1	AC2
Mseca	4663	4645	4640	4659	4646	4636
Msum	2679	2688	2688	2698	2698	2690
Msss	4703	4700	4691	4712	4705	4692
G	2304	2309	2317	2313	2315	2316
DMM	2494	2494	2490	2490	2455	2455
% vacíos	7,6	7,4	7,0	7,1	5,7	5,7

Tabla J - 2: Probetas para ensaye de ahuellamiento, fabricadas en laboratorio

Probeta	P1	P2	M1	M2	AC1	AC2
Mseca	4671	4664	4671	4668	4692	4686
Msum	2713	2719	2710	2720	2713	2718
Msss	4730	4728	4738	4732	4743	4736
G	2316	2322	2304	2319	2311	2322
DMM	2494	2494	2490	2490	2455	2455
% vacíos	7,1	6,9	7,5	6,9	5,9	5,4