



Universidad de Valparaíso
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Aplicación de Microaglomerados Discontinuos en
Caliente como alternativa de solución a las
deficiencias funcionales en drenabilidad y emisión de
ruido de rodado del Concreto Asfáltico de Superficie**

Por

Esteban Nicolás Vargas Lucero

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

Profesor Guía: Sr. Guillermo Brante Lara

Abril, 2015

RESUMEN

“Aplicación de Microaglomerados Discontinuos en Caliente como alternativa de solución a las deficiencias funcionales en drenabilidad y emisión de ruido de rodado del Concreto Asfáltico de Superficie”

El alto estándar que se exige actualmente en carreteras y vías urbanas, ha impulsado el desarrollo de mezclas especiales como los microaglomerados discontinuos en caliente (MDC). Estas mezclas de amplio uso en Europa poseen aspectos funcionales superiores en drenabilidad, adherencia neumático - pavimento, visibilidad de las marcas viales y emisión de ruido de rodado en comparación al concreto asfáltico de superficie (CAS), carpeta de rodado ampliamente utilizada en el país.

En el presente trabajo de título, se propone un diseño de pavimento flexible que considera como carpeta de rodado un MDC para la región de Valparaíso, como un diseño alternativo capaz de competir económicamente frente a un diseño tradicional equivalente que utiliza CAS, mejorando las cualidades funcionales existentes en materia de drenabilidad y emisión de ruido de rodado sin ir en desmedro de su capacidad estructural.

Los MDC presentan un mayor costo económico y un menor coeficiente estructural que el CAS. Ambas limitaciones impiden el uso masivo de estas mezclas, sin embargo, existen diseños para niveles de tránsito específicos que logran aproximarse económicamente y con similar capacidad soportante frente a los diseños tradicionales. Esto se consigue modificando el espesor de una carpeta intermedia (binder), cuyo costo es considerablemente menor a las carpetas de rodado. Esta iteración se realiza mediante el método de diseño AASHTO y el programa computacional PAVIVIAL 1.0, ambos dispuestos en el Manual de Carreteras.

El diseño de pavimento propuesto es capaz de soportar solicitaciones de tránsito de hasta 6 millones de ejes equivalentes (EE), siendo un 4% más caro que uno tradicional, no obstante, se recomienda el uso de este tipo de mezclas en carreteras de alto tránsito, debido a que la relación costo/beneficio disminuye a medida que las solicitaciones de carga aumentan. Este costo de inversión inicial, se puede equiparar o compensar con un menor costo de mantención durante su vida útil, ya que existen estudios que respaldan su mayor durabilidad y resistencia a la fatiga.

Palabras claves: carpeta de rodado, microaglomerados discontinuos en caliente, concreto asfáltico de superficie, drenabilidad, ruido de rodado.

AGRADECIMIENTOS

Es para mí un verdadero placer dedicar estas líneas a todas aquellas personas que han colaborado para que este trabajo llegue a un feliz término.

A mi familia, fuente de apoyo constante e incondicional en toda mi vida y más aún en mis años de formación profesional. Ellos han inculcado en mí el sentido de seriedad, responsabilidad y rigor en todos los desafíos que la vida presente, como clave del éxito.

Debo agradecer de manera especial y sincera al Profesor Guillermo Brante Lara, por aceptarme y desarrollar este tema bajo su dirección. A su manera, ha sido capaz de ganarse mi lealtad y admiración. Su apoyo, confianza y capacidad para guiar mis ideas han sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de este trabajo, sino también en mi formación como Ingeniero Civil.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	3
3.1. Objetivo General.....	3
3.2. Objetivos Específicos.....	3
4. ALCANCES DEL ESTUDIO	3
5. METODOLOGÍA DE TRABAJO	4
6. MARCO TEÓRICO	5
6.1. Pavimento flexible.....	5
6.2. Componentes estructurales de un pavimento flexible.....	5
6.3. Funciones y características exigidas para carpetas de rodadura	6
6.4. Microaglomerados discontinuos en caliente	7
6.4.1. Clasificación.....	7
6.4.2. Características	8
6.5. Aspectos funcionales	10
6.5.1. <i>Spray</i> de agua.....	10
6.5.2. Ruido de rodadura	10
6.6. Programa computacional PAVIVIAL 1.0.....	10
7. NORMATIVA VIGENTE EN CHILE	12
7.1. Categorías de tránsito.....	12
7.2. Materiales.....	12
7.2.1. Áridos	12
7.2.2. Árido grueso	12
7.2.3. Árido fino	13
7.2.4. Relleno mineral (filler)	14
7.2.5. Granulometrías	15
7.3. Asfalto	16
7.4. Aditivos.....	17
7.5. Propiedades de las mezclas asfálticas	17
7.6. Procedimientos de Trabajo	18
7.6.1. Requisitos generales de transporte y colocación	18
7.6.2. Compactación.....	18
7.6.3. Macrotextura superficial	19

7.6.4.	Coeficiente de fricción.....	19
7.6.5.	Control de rugosidad (IRI).....	20
8.	COMPARACIÓN DE ASPECTOS FUNCIONALES EN DRENABILIDAD Y EMISIÓN DE RUIDO DE RODADURA ENTRE LOS MDC Y CAS.....	21
8.1.	Drenabilidad	21
8.2.	Emisión de ruido de rodadura	23
9.	CRITERIOS PARA DETERMINAR LAS VARIABLES DE DISEÑO	25
9.1.	Número estructural	25
9.2.	Serviciabilidad	25
9.3.	Solicitaciones.....	26
9.3.1.	Período de diseño estructural.....	26
9.3.2.	Tránsito medio diario anual y tasa de crecimiento	26
9.3.3.	Estratigrafía de carga.....	27
9.4.	Nivel de confianza	27
9.5.	Módulo resiliente (M_R).....	28
9.6.	Coeficientes de drenaje (m_i).....	28
9.7.	Coeficientes estructurales (a_i)	29
9.8.	Temperatura media anual ponderada del aire (TMAPA).....	30
10.	DETERMINACIÓN DEL DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE.....	32
11.	COMPARACIÓN DE COSTOS DE MATERIALES DE LOS DISEÑOS EQUIVALENTES	40
12.	CONCLUSIONES	53
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
	ANEXOS	57
	ANEXO A	58

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (USA)
a_i	Coefficiente estructural
CAS	Concreto Asfáltico de Superficie
CBR	California Bearing Ratio (USA)
dB	Decibel
EE	Ejes Equivalentes
F_R	Factor de confiabilidad
h_i	Espesor de capa
IRI	Índice de Regularidad Internacional
LNV	Laboratorio Nacional de Vialidad
MDC	Microaglomerados Discontinuos en Caliente
m_i	Coefficiente de drenaje
mm	Milímetros
MPa	Megapascal
M_R	Módulo resiliente efectivo
NE	Número Estructural
NE_A	Número Estructural a nivel de base
NE_T	Número Estructural total
NLT	Norma de Ensaye del Laboratorio de Transportes y Mecánica de Suelos José Luis Escario (España).
p_f	Índice de serviciabilidad final
p_i	Índice de serviciabilidad inicial
S_0	Error combinado
TMAPA	Temperatura Media Anual Ponderada del Aire
TMDA	Tránsito Medio Diario Anual
Z_R	Distribución normal estándar

LISTA DE TABLAS

Tabla 6.1 Mezclas asfálticas estudiadas.....	8
Tabla 6.2 <i>Ranking</i> de las mezclas asfálticas estudiadas según resistencia a fatiga	9
Tabla 7.1 Categoría de tránsito pesado.....	12
Tabla 7.2 Especificaciones para árido grueso.....	13
Tabla 7.3 Especificaciones para árido fino.....	14
Tabla 7.4 Requisitos para el polvo mineral	14
Tabla 7.5 Proporciones mínimas de filler de aportación.....	14
Tabla 7.6 Bandas granulométricas para MDC	15
Tabla 7.7 Banda granulométrica mezcla tradicional.....	15
Tabla 7.8 Exigencia para el cemento asfáltico	16
Tabla 7.9 Dotaciones de las mezclas	17
Tabla 7.10 Requisitos para el diseño de mezclas	18
Tabla 7.11 Macrotextura superficial.....	19
Tabla 7.12 Coeficiente de fricción.....	20
Tabla 7.13 Coeficiente de fricción con péndulo TRRL.....	20
Tabla 7.14 Índice de regularidad internacional.....	20
Tabla 9.1 Vida de diseño.....	26
Tabla 9.2 Nivel de confianza y valor de S_0	27
Tabla 9.3 Coeficiente de drenaje.....	29
Tabla 9.4 Coeficientes estructurales.....	30
Tabla 9.5 Cálculo de la temperatura media anual ponderada del aire (TMAPA).....	31
Tabla 9.6 Resumen variables de diseño.....	31
Tabla 10.1 Valores de las variables utilizadas para el cálculo de NE_A DISPUESTO y NE_T DISPUESTO	33
Tabla 10.2 Números estructurales dispuestos para los diseños CAS + binder	34
Tabla 10.3 Números estructurales dispuestos para los diseños MDC + binder.....	35
Tabla 10.4 Números estructurales requeridos NE_A y NE_T para diferentes EE	36
Tabla 10.5 Diseños equivalentes entre CAS + binder y MDC + binder.....	37
Tabla 10.6 Diseños equivalentes entre CAS y MDC + binder	39
Tabla 10.7 Diseños equivalentes entre CAS + binder y MDC + binder.....	39
Tabla 11.1 Costo de materiales para 2 millones de EE - pavimento tradicional	41
Tabla 11.2 Costo de materiales para 2 millones de EE - pavimento alternativo.....	41
Tabla 11.3 Costo de materiales para 2,5 millones de EE - pavimento tradicional	41
Tabla 11.4 Costo de materiales para 2,5 millones de EE - pavimento alternativo.....	42
Tabla 11.5 Costo de materiales para 3 millones de EE - pavimento tradicional	42
Tabla 11.6 Costo de materiales para 3 millones de EE - pavimento alternativo.....	42
Tabla 11.7 Costo de materiales para 3,5 millones de EE - pavimento tradicional	43
Tabla 11.8 Costo de materiales para 3,5 millones de EE - pavimento alternativo.....	43
Tabla 11.9 Costo de materiales para 4 millones de EE - pavimento tradicional	43
Tabla 11.10 Costo de materiales para 4 millones de EE - pavimento alternativo.....	44
Tabla 11.11 Costo de materiales para 4,5 millones de EE - pavimento tradicional	44
Tabla 11.12 Costo de materiales para 4,5 millones de EE - pavimento alternativo.....	44
Tabla 11.13 Costo de materiales para 5 millones de EE - pavimento tradicional	45
Tabla 11.14 Costo de materiales para 5 millones de EE - pavimento alternativo.....	45
Tabla 11.15 Costo de materiales para 5,5 millones de EE - pavimento tradicional	45
Tabla 11.16 Costo de materiales para 5,5 millones de EE - pavimento alternativo.....	46

Tabla 11.17 Costo de materiales para 6 millones de EE - pavimento tradicional	46
Tabla 11.18 Costo de materiales para 6 millones de EE - pavimento alternativo.....	46
Tabla 11.19 Costo de materiales para 500.000 EE - pavimento tradicional	47
Tabla 11.20 Costo de materiales para 500.000 EE - pavimento alternativo.....	47
Tabla 11.21 Costo de materiales para 1 millón de EE - pavimento tradicional.....	47
Tabla 11.22 Costo de materiales para 1 millón de EE - pavimento alternativo.....	48
Tabla 11.23 Costo de materiales para 7 millones de EE - pavimento tradicional	48
Tabla 11.24 Costo de materiales para 7 millones de EE - pavimento alternativo.....	48
Tabla 11.25 Costo de materiales para 9 millones de EE - pavimento tradicional	49
Tabla 11.26 Costo de materiales para 9 millones de EE - pavimento alternativo.....	49
Tabla 11.27 Costo de materiales para 15 millones de EE - pavimento tradicional	49
Tabla 11.28 Costo de materiales para 15 millones de EE - pavimento alternativo.....	50
Tabla 11.29 Resumen costos materiales diseños equivalentes entre 2 y 6 millones de EE	51
Tabla 11.30 Resumen costos materiales diseños equivalentes menores a 2 millones de EE	51
Tabla 11.31 Resumen costos materiales diseños equivalentes mayores a 6 millones de EE	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 6.1 Resistencia a fatiga para las distintas mezclas	9
Figura 7.1 Curva granulométrica IV-A-12 y M10	16
Figura 8.1 <i>Aquaplaning</i> y el restablecimiento del contacto con el pavimento.....	21
Figura 8.2 Conducción con lluvia en MDC.....	22
Figura 8.3 Conducción con lluvia en CAS.....	22
Figura 8.4 Macrotextura negativa de un pavimento	23
Figura 8.5 Disminución del ruido del tráfico mediante empleo de un MDC	24
Figura 10.1 Estructuras de pavimento flexible	32
Figura 10.2 Espesor de binder necesarios para diferentes EE	37
Figura 11.1 Costos de diseños equivalentes para diferentes EE	52

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 9.1.....	25
Ecuación 9.2.....	25
Ecuación 9.3.....	27
Ecuación 9.4.....	28
Ecuación 9.5.....	28
Ecuación 9.6.....	28
Ecuación 9.7.....	30
Ecuación 10.1.....	33
Ecuación 10.2.....	33

1. INTRODUCCIÓN

La red vial nacional es fundamental para el desarrollo del país, influyendo en el ámbito económico, social, transporte de bienes y servicios, así como la movilidad de las personas. Los pavimentos flexibles son los más utilizados en Chile, alcanzando el 89% de los caminos pavimentados.

El alto estándar que se exige actualmente en carreteras y vías urbanas, sumado al importante crecimiento del parque automotriz, demanda a los profesionales del área a mantenerse en una constante búsqueda de nuevas tecnologías con el fin de mejorar diseños, normativas y procesos constructivos para optimizar el desempeño de las vías, el que depende de dos condiciones, una estructural y otra funcional, siendo esta última característica la que se ha posicionado como relevante en el último tiempo, debido a que tiene directa relación con la calidad del servicio entregado por un camino y es percibida por el usuario a través de la seguridad y comodidad.

El presente trabajo de título pretende incentivar la aplicación de nuevos diseños de pavimentos flexibles, utilizando microaglomerados discontinuos en caliente (MDC) como carpeta de rodado. Estas mezclas de amplio uso en Europa poseen aspectos funcionales superiores en drenabilidad, adherencia neumático - pavimento, visibilidad de las marcas viales y emisión de ruido de rodado en comparación al CAS, carpeta de rodado ampliamente utilizada en el país.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desempeño de un pavimento depende de dos condiciones, una estructural y otra funcional. Es esta última característica la que se ha posicionado como relevante en la actualidad, ya que tiene directa relación con la calidad operacional o serviciabilidad que ofrece un pavimento percibida por el usuario [1].

El CAS corresponde a la carpeta de rodado que posee la mayor extensión a lo largo de la red vial nacional, sin embargo el alto estándar que se exige actualmente en carreteras y vías urbanas, ha impulsado el desarrollo de nuevas carpetas de rodado con mejores características funcionales específicas en temas como: producción de *spray* de agua, atenuación del ruido de rodado, visibilidad de las marcas viales entre otras [2,3,4,5].

Cuanto menor sea la capacidad de drenaje que posea un pavimento, mayor es la probabilidad de que se forme una película de agua continua en su superficie [6]. Dicha situación genera efectos adversos ligados al hidroplaneo (pérdida de adherencia neumático-pavimento) y a la disminución de visibilidad proveniente del efecto *spray* (agua pulverizada o neblina que proyectan los vehículos a su paso) lo que sitúa al conductor en un escenario poco favorable e inseguro.

Las ciudades son los centros más afectados por el ruido, siendo uno de los más relevantes los provenientes del tráfico, los que alcanzan el 80% del impacto acústico producido en la zona urbana. Este escenario provoca la disminución de la calidad de vida de las personas expuestas a niveles de ruidos dañinos [7].

Dentro de las mezclas especiales más utilizadas en Europa, destacan los MDC, carpetas de rodado que presentan mejores desempeños que los pavimentos tradicionales en relación a drenabilidad y emisión de ruido de rodado [8].

Finalmente, resulta indispensable disminuir el impacto acústico proveniente del tráfico y aumentar las condiciones de seguridad del conductor en las obras viales del país. Por esta razón, en el presente trabajo de título, se propone un diseño de pavimento flexible que considera como carpeta de rodado un MDC para la región de Valparaíso, como un diseño alternativo capaz de competir económicamente frente a un diseño tradicional equivalente que utiliza CAS, mejorando las cualidades funcionales existentes en materia de drenabilidad y emisión de ruido de rodado sin ir en desmedro de su capacidad estructural.

3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

A continuación se presentan los objetivos, tanto generales como específicos, planteados para el presente trabajo de título.

3.1. Objetivo General

Proponer un diseño de pavimento flexible para la región de Valparaíso, en donde la carpeta de rodado sea un MDC estructuralmente equivalente al diseño tradicional, capaz de competir económicamente y que mejore las deficiencias funcionales existentes en materia de drenabilidad y emisión de ruido de rodado presentes en el CAS.

3.2. Objetivos Específicos

- Comparar cuantitativamente los aspectos técnicos de las mezclas asfálticas utilizadas: calidad de áridos, granulometrías, dosificación y textura superficial.
- Comparar aspectos funcionales en drenabilidad y emisión de ruido de rodado entre los MDC y CAS.
- Determinar las condiciones de diseño del pavimento y la estructura a proponer de acuerdo a las recomendaciones del Manual de Carreteras.
- Comparar los costos iniciales de las carpetas asfálticas del pavimento propuesto con un pavimento tradicional, estructuralmente equivalente (capacidad soportante).

4. ALCANCES DEL ESTUDIO

Proponer una alternativa de pavimento flexible nuevo, capaz de mejorar aspectos funcionales en drenabilidad y emisión de ruido de rodado de las mezclas tradicionales. Dado que sus diferencias funcionales radican en las capas asfálticas, sólo modificando el espesor del binder se obtendrá el diseño económicamente más competitivo para la región de Valparaíso, utilizando el método de diseño AASHTO 93 dispuesto en el Manual de Carreteras.

5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología definida para cumplir los objetivos de este trabajo ha sido estructurada de la siguiente manera:

- Se revisaron y analizaron los antecedentes técnicos de las mezclas asfálticas involucradas en el diseño del pavimento, y se contrastaron sus distintas exigencias mediante cuadros comparativos.
- Se recopilaron antecedentes bibliográficos relacionados con emisión de ruido de rodadura y drenabilidad en ambas superficies de rodado, estableciendo propiedades y características que diferencian a los MDC con respecto a las mezclas tradicionales en esta materia.
- Se determinó qué carpeta de rodado, “dentro de los MDC” es más idónea según sea el aspecto funcional a tratar.
- Se definió el espesor de MDC a utilizar en base a los estudios de drenabilidad y emisión de ruido de rodadura.
- Se determinaron las variables de diseño en base a la zona del proyecto y recomendaciones estipuladas en el Manual de Carreteras.
- Se cotizaron los costos por metro cúbico ($\$/m^3$) de las carpetas asfálticas utilizadas (MDC, CAS y binder).
- Se determinó la estructuración y espesor de las capas de los pavimentos flexibles a comparar, para luego, mediante un proceso iterativo, ir modificando el espesor del binder hasta obtener el diseño equivalente más competitivo en razón costo/beneficio para distintos niveles de tránsito, utilizando el método AASHTO 93.
- Se compararon los precios de los distintos diseños CAS + binder y MDC + binder analizados.
- Se plantearon conclusiones y comentarios a partir de los resultados.

6. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se expone la información relevante y esencial de los pavimentos flexibles y de los MDC, para una mejor comprensión del tema.

6.1. Pavimento flexible

Los pavimentos flexibles son usualmente conocidos como pavimentos asfálticos, y se caracterizan por ser sistemas multicapa con materiales de mejor calidad (mayor módulo elástico) cerca de la superficie donde las tensiones son mayores. La principal función de la estructura del pavimento es permitir la circulación de los vehículos de forma rápida, cómoda y segura. Debe ser resistente a la acción del tránsito, a los agentes atmosféricos y transmitir los esfuerzos producidos por las cargas vehiculares hasta la subrasante, con magnitudes inferiores a la capacidad de soporte del suelo de fundación [8].

6.2. Componentes estructurales de un pavimento flexible

Las capas estructurales utilizadas en los pavimentos flexibles son las siguientes [9]:

- a) *Subrasante*: Es la superficie que sirve de fundación de la estructura o pavimento y que se extiende hasta una profundidad en que no afecte la carga de diseño, que corresponde al tránsito previsto.
- b) *Sub-base granular*: Es la primera capa de la estructura del pavimento que se dispone sobre la subrasante, con el fin de facilitar un buen drenaje en el pavimento y permitir la construcción del resto de la estructura. En esta capa se presenta una disipación parcial de esfuerzos, pudiendo absorber algunos cambios de volumen de la subrasante y puede sustituir económicamente parte de la base. No siempre se considera en los diseños, y se construye con materiales menos exigentes que los utilizados en la base.
- c) *Base granular*: Es la capa que se construye sobre la subbase granular, y en su construcción se emplean materiales de mejor calidad y con mejores especificaciones de construcción. Su importancia radica en su capacidad estructural y de protección del resto del pavimento. Esta capa es indispensable para cualquier sistema de pavimentos, ya que en ella se presenta la mayor disipación de esfuerzos.
- d) *Base asfáltica*: Es una mezcla asfáltica procesada en caliente, diseñada para tránsito pesado, utilizada como capa complementaria bajo un binder o una carpeta de rodado, para mejorar la estructura de un pavimento.
- e) *Capa intermedia (binder)*: Es una mezcla de áridos procesados y chancados más un cemento asfáltico, que se produce en planta en un proceso en caliente. Se aplica como capa de apoyo bajo una carpeta asfáltica de rodado. Normalmente su espesor está comprendido entre 5 y 10 cm, dependiendo del diseño estructural y tipo de tránsito.

- f) *Carpeta de rodado*: Es la capa superior del pavimento y sobre ella circulan los vehículos durante su vida útil. Debe ser resistente a la abrasión generada por el tránsito y a la agresión del medio ambiente. Tiene la función de proteger la estructura, impermeabilizando la superficie del pavimento, además de ser cómoda y segura para los usuarios.

6.3. Funciones y características exigidas para carpetas de rodadura

Las funciones principales que se les exige son las siguientes [2]:

- *Seguridad en la rodadura*: Una buena adherencia neumático – pavimento, en cualquier situación, se consigue dotando a las mezclas de una macrotextura (efecto de la dosificación y tamaño máximo del árido) y microtextura (efecto del coeficiente de pulimento acelerado del árido) adecuadas.
- *Impermeabilidad*: Para impedir la penetración del agua superficial en las capas inferiores del pavimento y en la subrasante. Se consigue dosificando los materiales, de tal manera que los huecos en mezcla sean mínimos o disponiendo bajo la rodadura de un material impermeable.
- *Regularidad superficial*: Es percibida por el usuario y debe presentar una textura homogénea, uniforme y exenta de segregaciones, entregando una adherencia adecuada. Esta cualidad se obtiene mediante una puesta en obra aceptable, que depende fundamentalmente de la conseguida en las capas inferiores.
- *Confort*: Se refiere a la comodidad en la circulación en lo relativo al ruido de rodadura, visibilidad nocturna, visibilidad en momentos de lluvia, entre otras. El ruido de rodadura depende fundamentalmente del contenido de huecos del material y del tamaño máximo de las partículas. La visibilidad en momentos de lluvia depende del contenido de huecos y de la textura superficial. La visibilidad nocturna depende del contraste entre la marca vial y el pavimento, siendo mayor cuanto más negra sea la superficie (mayor contenido de ligante).
- *Aspecto Estético*: Conseguido mediante superficies homogéneas y ricas en ligante, ya que las rodaduras constituyen parte importante de la imagen que ofrece una determinada administración de carreteras. En algunas situaciones se precisa conseguir efectos estéticos con materiales coloreados o integración en el paisaje.

Por otro lado, las rodaduras tienen que ser duraderas, a través de una serie de características:

- Resistencia a las deformaciones plásticas.
- Resistencia al envejecimiento, ya que éste puede originar fisuraciones y desprendimientos.
- Resistencia a la desintegración, especialmente por la acción de agua y del hielo.

Además de las funciones señaladas a las rodaduras, igual que a todos los materiales del pavimento, se les exige economía y sustentabilidad ambiental, concepto que cada vez tiene mayor importancia durante el ciclo de vida de los mismos.

6.4. Microaglomerados discontinuos en caliente

Son mezclas asfálticas especiales utilizadas en capas de pequeño espesor, con textura macrorrugosa áspera, presentan excelente comportamiento mecánico, gran durabilidad y sin problemas de incremento de sonoridad.

Conseguir una buena macrotextura utilizando áridos de tamaño máximo pequeño, ha sido posible gracias a la modificación de la granulometría, sustituyéndose las curvas granulométricas continuas tradicionales por otras de tipo discontinuo, mediante la eliminación total o parcial de alguna fracción del árido.

Los MDC se basan en la utilización de cementos asfálticos modificados con polímeros, áridos de elevada calidad y de granulometría discontinua. Están confeccionadas con árido de tamaño máximo absoluto de 12,5 mm y se extienden en una capa de espesor promedio menor o igual a 2,5 veces el tamaño máximo señalado [10].

Estas mezclas se aplican como carpeta de rodado en espesores menores o iguales a 3,8 cm, es decir, en capas más delgadas que los CAS, cuyo espesor de extendido es igual o superior a 5 cm. Dichos espesores están regulados por un tema de constructibilidad y estabilidad de cada mezcla.

Su uso se centraliza especialmente en la mantención de pavimentos, con el fin de proporcionar o restituir características superficiales como: resistencia al deslizamiento, drenabilidad, *confort* y seguridad del usuario.

6.4.1. Clasificación

En la actualidad existen 2 tipos de mezclas discontinuas normalizadas:

- Las mezclas tipo F, denominadas así por ser capas finas, se subdividen en dos bandas granulométricas, F8 y F10, con un tamaño máximo nominal de 8 y 10 mm respectivamente y sus espesores de aplicación fluctúan entre 2,0 y 3,8 cm [10].
- Las mezclas tipo M, también conocidas como monogranulares, por ser aun más finas que las anteriores, se subdividen en dos bandas granulométricas, M8 y M10, con un tamaño máximo nominal de 8 y 10 mm respectivamente y sus espesores de aplicación fluctúan entre 1,0 y 2,5 cm [10].

La particularidad de estas mezclas radica en que sus áridos tienen granulometrías discontinuas, las que contemplan un elevado contenido de árido grueso, 70% a 80%, lo cual asegura un buen rozamiento interno del esqueleto mineral y un contenido de árido fino no superior al 10%. El diseño de los MDC se basa en el método Marshall y/o Cántabro según sea el tipo.

6.4.2. Características

Según la experiencia de países desarrollados como España, Francia y Alemania, los MDC cuentan con mejores características de rodado que las mezclas tradicionales, entre las que destacan las siguientes:

- Elevada capacidad de drenaje superficial producto de su macrotextura, mejorando la visibilidad del camino y de las marcas viales en días de lluvia, así como una disminución del efecto *spray* de agua del vehículo que precede [11].
- Excelente comportamiento al deslizamiento, tanto en pavimento mojado como en zonas de bajas temperaturas, donde evita la formación del llamado hielo negro [5].
- Disminución del ruido de rodadura; 2 decibeles en pavimento seco y hasta 5 decibeles en pavimento mojado, ventaja altamente valorada en zonas urbanas [12].
- Mayor durabilidad debido al asfalto modificado con polímeros que utilizan, presentando mayor resistencia al envejecimiento, deformación y fisuración del pavimento [13].

Investigaciones nacionales efectuadas el año 2011 por el Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María, encabezadas por los Srs. Carlos Wahr, Rodrigo Delgadillo y Gabriel García, midieron la susceptibilidad a la fatiga de un grupo representativo de betunes asfálticos y mezclas asfálticas usados actualmente en Chile tales como: mezclas tradicionales (IV - A - 12 tradicional y IV - A - 12 modificada con polímeros), microaglomerados discontinuos en caliente (M10) y las *stone mastic asphalt* (SMA alemana y SMA pobre) (Tabla 6.1). Como resultado concluyeron que los MDC (M10) presentan mayor resistencia a la fatiga respecto a las mezclas tradicionales (IV-A-12 Trad.) lo que se detalla en la Figura 6.1 y Tabla 6.2. Esto se debe a la fuerte influencia del tipo de betún utilizado, siendo los betunes modificados los que presentan un desempeño significativamente superior en la resistencia al agrietamiento respecto a los betunes tradicionales. Para mayor detalle ver Anexo A.

Tabla 6.1 Mezclas asfálticas estudiadas [14]

Mezcla asfáltica	Granulometría	Ligante asfáltico
IV - A - 12 Trad	IV - A - 12	CA 24 (Trad)
IV - A - 12 Mod	IV - A - 12	60 - 80 (Mod)
M - 10	M - 10	60 - 80 (Mod)
SMA Ale	SMA 11 S	60 - 80 (Mod)
SMA Pob	SMA 11 S	60 - 80 (Mod)

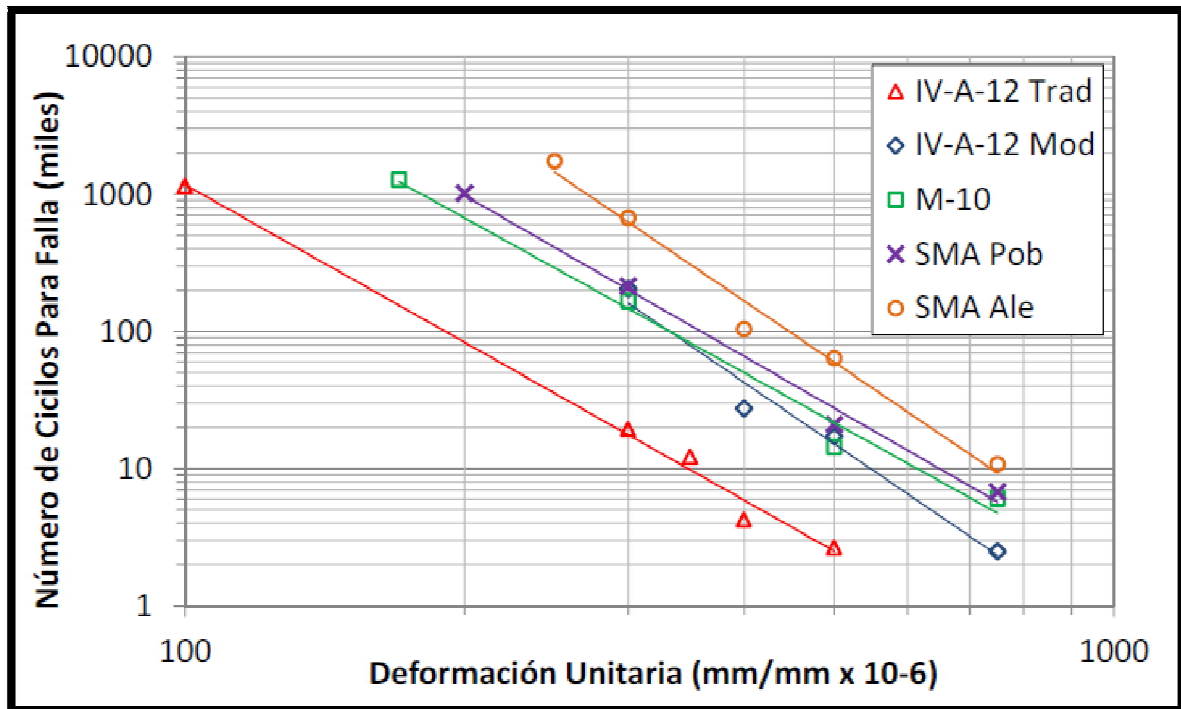


Figura 6.1 Resistencia a fatiga para las distintas mezclas [14]

Tabla 6.2 *Ranking* de las mezclas asfálticas estudiadas según resistencia a fatiga [14]

Mezcla asfáltica	Ligante asfáltico		N_{500}	ϵ_6 ($\mu\epsilon$)	<i>Ranking</i>
SMA Ale	Modificado	PG 70 – 22	63896	271	1
IV - A - 12 Mod 2	Modificado	PG 70 – 28	50413	312	1
SMA Pob	Modificado	PG 70 – 22	21060	199	2
IV - A - 12 Mod	Modificado	PG 70 – 22	15189	202	2
M - 10	Modificado	PG 70 – 22	14404	180	2
IV - A - 12 Trad	Tradicional	PG 64 – 22	2661	104	3

6.5. Aspectos funcionales

6.5.1. Spray de agua

La producción de *spray* o agua pulverizada de vehículos que circulan a velocidades superiores a 80 km/h en un pavimento con agua, produce condiciones críticas de visibilidad, transformándose en un problema de seguridad permanente en autopistas y carreteras con grandes volúmenes de tránsito. Se han desarrollado equipos prototipos de medición del agua pulverizada (*spray*), sin embargo estos sistemas aún no son aplicados mundialmente. En países como Gran Bretaña, se han llevado a cabo investigaciones para el control de *spray* en los camiones a través del diseño de cortinas en los bordes de los tapabarros y otras soluciones similares pero, en la actualidad, la medida más efectiva para reducir la producción de *spray* es a través de la construcción de pavimentos con superficies permeables [11].

6.5.2. Ruido de rodadura

El ruido está asociado principalmente a la temática del medio ambiente y el efecto negativo que tiene en la población. El ruido de los vehículos es en general, la superposición de tres fuentes cuyos orígenes son: la propulsión del motor, el ruido de rodadura neumático – pavimento y el ruido aerodinámico. El ruido aerodinámico supera a los otros cuando las velocidades son superiores a 80 – 100 km/h. Entre 50 – 80 km/h predomina el ruido de rodadura y por debajo de los 40 – 50 km/h el ruido del motor es mayormente predominante.

El ruido de rodado depende de la velocidad de los vehículos y del tipo de pavimento, se origina de la compresión y liberación del aire atrapado entre el neumático y el pavimento. Este tipo de ruido afecta áreas cercanas a las carreteras y, dependiendo del volumen y tipo de vehículos, se puede superar muy rápidamente umbrales tolerables. El ruido aumenta en superficies de pavimento lisas debido al mayor volumen de aire que se comprime bajo la rueda.

En aquellas zonas donde sea necesario controlar el nivel de emisión de ruido, éste se puede mitigar principalmente a través de dos estrategias, la primera consiste en bloquear el ruido mediante barreras de sonido y la segunda con la construcción de pavimentos porosos [15].

6.6. Programa computacional PAVIVIAL 1.0

El programa computacional PAVIVIAL 1.0 es parte integrante del Volumen N°3 “Instrucciones y Criterios de Diseño” del Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad y es propiedad del Ministerio de Obras Públicas.

Dicho software permite determinar los espesores de las capas de pavimento de acuerdo con los criterios, relaciones y consideraciones expuestas en el capítulo 3.600, volumen N°3 del Manual.

El uso de este programa no garantiza por si solo un buen comportamiento del pavimento. El buen diseño lleva implícito el conocimiento cabal de todos los factores que intervienen especialmente las propiedades de los suelos, el clima y la experiencia laboral.

El diseño de los pavimentos flexibles se basa en la AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES, con algunas modificaciones basadas en la experiencia nacional, publicado por la AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS en el año 1993.

Con respecto al funcionamiento del software los cuadros y tablas que se pueden llamar al asignar valores a los parámetros de cálculo son los que figuran como recomendados en el Manual de Carreteras, pero en ningún caso es obligatorio utilizarlos para operar el programa.

Las tablas y formulas suplementarias tienen como único objetivo ayudar en la selección de los parámetros, pero deja en completa libertad al diseñador para utilizar un valor diferente al que emana de esas tablas o formulas.

Para el diseño del pavimento, es necesario obtener el número de ejes equivalentes a partir del Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) medido en terreno. Para ello, se distinguen los distintos tipos de vehículos censados en la ruta seleccionada, siendo los vehículos pesados los que inciden de forma directa en los resultados. Además, es necesario tener en cuenta la climatología de la zona, así como el valor del índice de Capacidad Portante (CBR) del suelo.

Una vez ingresados los datos solicitados por el programa y conocida la conformación de la estructura de pavimento, el software PAVIVIAL entrega los números estructurales requeridos a nivel de base y a nivel total necesarios para soportar los ejes equivalentes en estudio, y así determinar los espesores necesarios de cada una de las capas que componen el pavimento y soportar dicha demanda.

Las unidades de medida que utiliza son las del sistema universal de medidas [23].

7. NORMATIVA VIGENTE EN CHILE

En la presente sección se presenta la normativa vigente en Chile (Manual de Carreteras) que rige para los MDC y se contrastará con las mezclas asfálticas en caliente (CAS y binder), exponiendo las exigencias que caracterizan a cada una de estas mezclas.

7.1. Categorías de tránsito

Para los MDC es necesario definir las siguientes categorías de tránsito pesado, ya que el Manual de Carreteras tiene requisitos diferenciados según estas categorías:

Tabla 7.1 Categoría de tránsito pesado [10]

Categorías de Tránsito	Tránsito Medio Diario (TMDA)
T0	$TMDA \geq 2000$
T1	$2000 > TMDA \geq 800$
T2	$800 > TMDA \geq 200$
T3	$200 > TMDA$

Como se muestra en la Tabla 7.1, se utiliza el TMDA para establecer las categorías de tránsito pesado, considerando todo tipo de vehículos, sin separar los livianos de los pesados.

La estimación de los flujos de tránsito es una de las etapas críticas durante el proceso de diseño estructural de pavimentos, porque no siempre se cuenta con buenos registros de tránsito, debido a las variaciones estacionales y a la incertidumbre del aumento del flujo vehicular.

7.2. Materiales

7.2.1. Áridos

A continuación se compararán las mezclas asfálticas tradicionales con los MDC, basados en las exigencias de áridos según su clasificación: fracción gruesa, fina y relleno mineral (filler).

7.2.2. Árido grueso

Corresponde a la fracción retenida en el tamiz 2,5 mm (ASTM N°8), la cual deberá estar constituida por partículas chancadas, tenaces y limpias, es decir, libres de arcillas o sustancias perjudiciales. En la Tabla 7.2 se estipulan los requisitos que debe cumplir la fracción gruesa.

Tabla 7.2 Especificaciones para árido grueso [10]

Ensaye	Método	Mezcla Asfáltica Tradicional		MDC
		CAS	Binder	
Equivalente de arena	8.202.9 (LNV 71)	No se especifica	No se especifica	Mínimo 50%
Azul de Metileno	NLT-171/90	No se especifica	No se especifica	Máximo 1
Partículas Chancadas				
Categorías T0, T1 y T2	8.202.6(LNV 3)	Mínimo 90%	Mínimo 70%	100%
Categorías T3, T4 y Bermas	8.202.6(LNV 3)			Mínimo 75%
Contenido de impurezas	NLT-172/86			< 0,5%
Índice de Lajas				
Categorías T0, T1 y T2	8.202.7(LNV 3)	Máximo 10%	Máximo 15%	Máximo 25% (Tipo F) Máximo 20% (Tipo M)
Categorías T3, T4 y Bermas	8.202.7(LNV 3)			Máximo 30% (Tipo M y F)
Desgaste de los Ángeles				
Categorías T0, T1 y T2	8.202.11(LNV 75)	Máximo 25%	Máximo 35%	Máximo 20% (Tipo F) Máximo 15% (Tipo M)
Categorías T3, T4 y Bermas	8.202.11(LNV 75)			Máximo 25% (Tipo M y F)
Pulimento Acelerado				
Categorías T0, T1 y T2	NLT-174/93	No se especifica	No se especifica	Mínimo 0,50
Categorías T3, T4 y Bermas	NLT-174/93	No se especifica	No se especifica	Mínimo 0,45
Adhesividad Ligante - árido en agua	8.302.29(LNV 9)	Mínimo 95%	Mínimo 95%	Mínimo 95%
Desintegración en Sulfato de Sodio	8.202.17(LNV 74)	Máximo 12%	Máximo 12%	No especifica
Adherencia Método Dinámico	8.302.31(LNV 44)	Mínimo 95%	Mínimo 95%	No especifica

7.2.3. Árido fino

Corresponde a la fracción que pasa bajo el tamiz 2,5 mm (ASTM N° 8) y que queda retenida en el tamiz 0,08 mm (ASTM N° 200), la cual deberá estar constituida por agregados provenientes de la trituración de rocas o gravas. Las partículas deben ser duras, tenaces y libres de arcillas o sustancias perjudiciales. Estos áridos deben cumplir además con los requisitos indicados en la Tabla 7.3, según el tipo de mezcla en la cual sean utilizados.

Los áridos finos no pueden exceder al 10% del peso total de la mezcla.

Tabla 7.3 Especificaciones para árido fino [10]

Ensaye	Método	Mezcla Asfáltica Tradicional		MDC
		CAS	Binder	
Equivalente de arena	8.202.9 (LNV 71)	No se especifica	No se especifica	Mínimo 50%
Azul de Metileno	NLT-171/90	No se especifica	No se especifica	Máximo 1
Adhesividad ligante-árido en agua	8.302.30(LNV10)	Mínimo 0% - 5%	Mínimo 0% - 5%	> 4%
Índice de Plasticidad	8.102.4 (LNV 90)	NP	NP	No se especifica
Desintegración Sulfato de Sodio	NLT-171/90	Máximo 15%	Máximo 15%	No se especifica

7.2.4. Relleno mineral (filler)

El Manual de Carreteras define al relleno mineral o filler a la fracción que pasa por el tamiz 0,16 mm (ASTM N° 100) y queda retenida en el tamiz 0,08 mm (ASTM N° 200). Su granulometría deberá ajustarse a lo indicado en la Tabla 7.4 y el polvo mineral que quede adherido a los áridos tras su paso por el secador, en ningún caso podrá ser superior al 2% del peso de la mezcla.

Si se requiere adicionar filler de aportación, éste deberá estar constituido por cemento hidráulico, cal u otro material inerte de origen calizo, libre de materia orgánica y partículas de arcilla. En la Tabla 7.5 se indican las proporciones mínimas a cumplir según la categoría de tránsito.

Tabla 7.4 Requisitos para el polvo mineral [10]

Ensaye	Método	Mezcla Asfáltica Tradicional		MDC
		CAS	Binder	
Densidad Aparente	8.202.19 (LNV 67)	No se especifica	No se especifica	0,5 - 0,8 gr./cm ³
Coeficiente de Emulsibilidad	NLT-180	No se especifica	No se especifica	< 0,6

Tabla 7.5 Proporciones mínimas de filler de aportación [10]

Categoría de Tránsito	Mezcla Asfáltica Tradicional		MDC
	CAS	Binder	
T0, T1 y T2	No se especifica	No se especifica	Mínimo 100 (% peso)
T3 y T4	No se especifica	No se especifica	Mínimo 50 (% peso)

7.2.5. Granulometrías

Los MDC están constituidos por 4 bandas granulométricas normalizadas: las Tipo M (M8 y M10) y las Tipo F (F8 y F10). Estas difieren en el tamaño máximo especificado según el uso que tendrán posteriormente las capas. En la tabla 7.6 se muestran las bandas, las cuales deberán combinar a lo menos tres fracciones de áridos para obtener discontinuidad granulométrica.

Tabla 7.6 Bandas granulométricas para MDC [10]

Denominación Tamices		Bandas				Tolerancia Banda Trabajo (%)
		M8	M10	F8	F10	
mm.	ASTM	% que pasa en peso				
12,5	1/2"		100		100	± 4
10	3/8"	100	75 - 97	100	75 - 97	± 4
8	5/16"	75 - 97	----	75 - 97	----	± 4
5	N°4	15 - 28	15 - 28	25 - 40	25 - 40	± 4
2,5	N°8	12 - 25	12 - 25	20 - 35	20 - 35	± 3
0,63	N°30	9 - 18	9 - 18	12 - 25	12 - 25	± 3
0,08	N°200	5 - 8	5 - 8	7 - 10	7-10	± 1

La fracción de árido que pasa por el tamiz N°4 y es retenida en el tamiz N°8 deberá ser inferior a 8%.

En cambio, para las carpetas asfálticas tradicionales, la banda granulométrica más utilizada es la IV-A-12, cuya banda acepta un tamaño máximo mayor que los que presentan las granulometrías para los MDC, teniendo una granulometría continua, es decir, posee una distribución similar a lo largo de las fracciones de áridos que constituyen su esqueleto mineral, lo que se traduce en un menor índice de huecos entre partículas. La banda tradicional se muestra en la Tabla 7.7.

Tabla 7.7 Banda granulométrica mezcla tradicional [10]

Denominación Tamices		Banda IV - A - 12
mm.	ASTM	% que pasa en peso
25	1"	
20	3/4"	100
12,5	1/2"	80 - 95
10	3/8"	70 - 85
5	N°4	43 - 58
2,5	N°8	28 - 42
0,63	N°30	13 - 24
0,315	N°50	8 - 17
0,16	N°100	6 - 12
0,08	N°200	4 - 8

A continuación, para mostrar los límites granulométricos, se elaboró un gráfico (Figura 7.1) estableciendo curvas máximas y mínimas para las bandas M10 (MDC) y IV-A-12 (CAS).

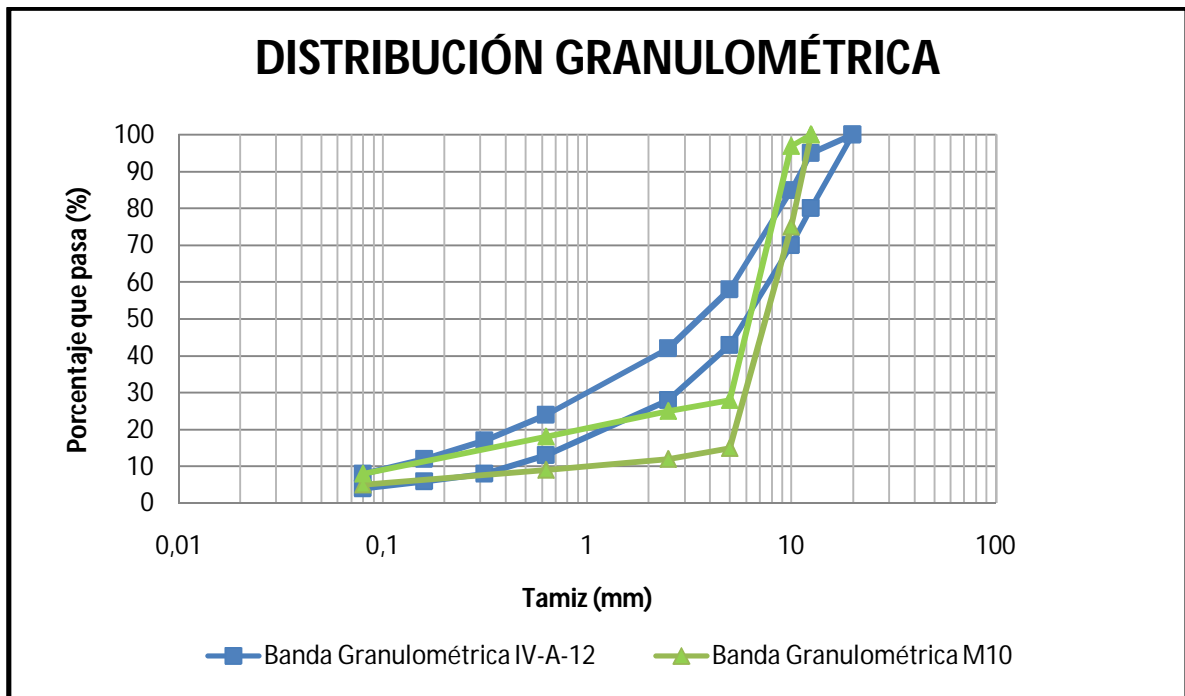


Figura 7.1 Curva granulométrica IV-A-12 y M10
Fuente: Adaptado [10]

7.3. Asfalto

Para los MDC se utilizarán cementos asfálticos del tipo 60/80 modificados con polímeros. En la Tabla 7.8 se detallan las exigencias que deben cumplir, y se comparan con un cemento asfáltico del tipo CA 24 para una mezcla tradicional.

Tabla 7.8 Exigencia para el cemento asfáltico [10]

Ensaye	Método	Mezcla Asfáltica Tradicional CA 24	MDC CA 60 - 80
Viscosidad absoluta a 60°C, 300 mm Hg, poises	8.302.15	Mínimo 2400	No se especifica
Penetración, 25°C, 100g, 5 s, 0,1 mm.	8.302.3(LNV 34)	Mínimo 40	60 - 80
Punto de Ablandamiento, °C	8.302.16(LNV 48)	Informar	Mínimo 65
Ductilidad, 5°C, 5 cm./min., cm.	8.302.8(LNV 35)	No se especifica	Mínimo 50

Ductilidad, 25°C, 5 cm./min., cm.	8.302.8(LNV 35)	Mínimo 100	Mínimo 80
Recuperación Elástica, 13 °C, 20 cm., 1 h, %	DIN 52013	No se especifica	Mínimo 60
Ensaye de la mancha (% xilol)	8.302.7	Máximo 30	No se especifica
Solubilidad en tricloroetileno,%	8.302.11	Mínimo 99	No se especifica
Índice de Penetración	8.302.21	-2 a +1	Mínimo +4
Índice de Fraass, °C	8.302.17(LNV 182)	No se especifica	Máximo -18
Punto de Inflamación, °C	8.302.9(LNV 36)	Mínimo 232	Mínimo 235

7.4. Aditivos

En los microaglomerados se podrán incorporar fibras minerales (lana de vidrio), orgánicas (celulosa) y sintéticas (polipropileno, poliésteres y acrílicas). Estas fibras permiten fijar un mayor contenido de ligante, lo que se traduce en una película más gruesa, sin el peligro de que este escurra.

Las fibras deben ser empleadas en pequeñas proporciones del peso del árido, y serán de 0,3% a 0,5% para celulosa y de 0,5% a 0,6% para poliéster o fibra de vidrio.

En el caso de las mezclas asfálticas tradicionales, no se especifica el uso de las fibras nombradas anteriormente, por lo que no se puede realizar una comparación entre ambas mezclas.

7.5. Propiedades de las mezclas asfálticas

Para el diseño de las mezclas, se deberá cumplir con los requisitos que se detallan a continuación según sea la carpeta utilizada.

Tabla 7.9 Dotaciones de las mezclas [10]

Detalle	Mezcla Asfáltica Tradicional	MDC
Dotación Media		
Tipo M8, kg/m ²	No se especifica	25 - 40
Tipo M10, kg/m ²	No se especifica	35 - 50
Tipo F8, kg/m ²	No se especifica	40 - 75
Tipo F10, kg/m ²	No se especifica	50 - 100
Asfalto		
Tipo M8 y M10, %	No se especifica	≥ 5,0
Tipo F8 y F10, %	No se especifica	≥ 5,5
Relación Filler/Ligante		
Tipo M8 y M10	No se especifica	1,2 - 1,4
Tipo F8 y F10	No se especifica	1,4 - 1,8

Tabla 7.10 Requisitos para el diseño de mezclas [10]

Ensaye	Mezcla Asfáltica Tradicional		MDC	
	CAS	Binder	Tipo F	Tipo M
Procedimiento	Marshall	Marshall	Marshall	Cantabro
Nº de golpes por cara	75	75	50	50
Tipo de probeta	Marshall	Marshall	Marshall	Marshall
Huecos en la mezcla, %	4 - 6	3 - 8	6 - 9	10 - 15
Estabilidad, KN	Mínimo 9	Mínimo 8	Mínimo 7,5	-----
Velocidad de deformación, intervalo 105-120 min.µm/min	-----	-----	Máx. 12 (Zonas Cálidas) Máx. 15 (Zonas Frías)	-----
Pérdida de resistencia, % (ensayo de inmersión compresión)	-----	-----	≤ 25	-----
Pérdida por abrasión en seco(25°C), %	-----	-----	-----	< 15
Fluencia (0,25 mm)	8 - 16	8 - 16	-----	-----

7.6. Procedimientos de Trabajo

7.6.1. Requisitos generales de transporte y colocación

Debido a que existe un mayor riesgo de que el ligante escurra y a la menor inercia térmica de los MDC en relación a una mezcla tradicional, se establecen las siguientes exigencias adicionales:

- El tiempo de transporte de la mezcla debe ser menor a 2 horas.
- Los camiones deben estar cubiertos con lonas o algún material que asegure un buen aislamiento térmico de la mezcla con el medio ambiente [10]

7.6.2. Compactación

Para la compactación de los MDC deberá utilizarse 2 rodillos lisos de peso comprendido entre 8 y 12 toneladas, sin vibración, para evitar variaciones en la granulometría de los áridos, a excepción de las juntas que se permite el uso de rodillo manual metálico vibrador, mientras que los rodillos neumáticos se prohíben producto que se adhieren con facilidad a la mezcla provocando desprendimiento de gravilla. Para las mezclas tradicionales, se especifica que la cantidad, peso y tipo de rodillos que se utilicen deberán ser los adecuados para alcanzar la compactación durante el tiempo que la mezcla sea trabajable. Entre los rodillos más utilizados se encuentran el rodillo tándem de dos ruedas de acero y el rodillo neumático.

Los tiempos disponibles para la compactación de los MDC son menores que en las mezclas tradicionales. La temperatura mínima de compactación dependerá del ligante utilizado, y no es

recomendable para obras en tiempo frío, especialmente con viento fuerte, debido a la rapidez con que se enfrían las mezclas asfálticas con polímeros.

Con respecto a la temperatura de compactación, ésta deberá estar comprendida entre los 110 °C y los 140 °C, pero para capas menores a 5 cm de espesor o mezclas del tipo MDC, se permite la compactación a temperaturas menores a 110 °C. En caso pertinente, el laboratorio indicará la temperatura adecuada de acuerdo a la viscosidad del cemento asfáltico modificado utilizado [10].

7.6.3. Macrotextura superficial

La superficie de la capa de rodadura deberá presentar una textura homogénea, uniforme y toda la capa estará exenta de segregaciones. Esto se debe cumplir para cualquier tipo de mezcla asfáltica en caliente.

Esta macrotextura superficial se medirá con el método de la mancha o círculo de arena. Este ensayo consiste en determinar un espesor equivalente mediante la aplicación de un volumen conocido de arena, y la medición del área total cubierta por este volumen, obteniéndose un valor para la macrotextura superficial promedio [16].

No existe una exigencia específica en este punto para los MDC, a pesar de que una de sus principales propiedades es una mayor macrotextura superficial, se debe regir por la exigencia para mezcla asfáltica tradicional, que se indica en la siguiente tabla:

Tabla 7.11 Macrotextura superficial [10]

Ensaye	Método	Exigencia
Mancha de arena	8.602.25	Mínimo 0,6 mm.

7.6.4. Coeficiente de fricción

La medición del coeficiente de fricción, se efectuará de preferencia dentro de un plazo de cuatro meses después de habilitar el tránsito. Esta se efectuará en forma continua en toda la longitud del camino y en cada una de las pistas. El equipo de medición de recepción es el SCRIM (*Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine*), y los valores se obtienen en unidades SFC (*Sideway Friction Coefficient*) medidos a 50 ± 5 Km/h e informados cada 200 metros o fracción de término. La exigencia de este parámetro se muestra en la Tabla 7.12 [10].

Tabla 7.12 Coeficiente de fricción [10]

Descripción del Sector		SFC
Sectores con Singularidades	Curvas de radio inferior a 100 m Pendiente $\geq 10\%$ Aproximación a Intersecciones Intersecciones Aproximaciones a Semáforos Aproximación a Señalización de Prioridad Ramales	0,55
Sectores sin Singularidades		0,4

Excepcionalmente se podrá controlar el coeficiente de fricción a través del péndulo de fricción TRRL, equipo dinámico que se utiliza para medir la energía perdida cuando una cara de un patín de goma se desliza sobre una superficie [16]. Para controlar el coeficiente de fricción a través del péndulo, se realizarán 20 mediciones por kilómetro por pista para proyectos urbanos y 10 por kilómetro por pista para otros proyectos [10]. La exigencia de éste parámetro se muestra en la Tabla 7.13.

Tabla 7.13 Coeficiente de fricción con péndulo TRRL [10]

Descripción del Sector		BPN
Sectores con Singularidades	Curvas de radio inferior a 100 m Pendiente $\geq 10\%$ Aproximación a Intersecciones Intersecciones Aproximaciones a Semáforos Aproximación a Señalización de Prioridad Ramales	Mínimo 65
Sectores sin Singularidades		Mínimo 55

7.6.5. Control de rugosidad (IRI)

La medición del IRI se realizará de acuerdo a lo especificado en el Manual de Carreteras [16]. Estas mediciones se realizarán con las medias fijas considerando los valores de 5 tramos consecutivos de 200 m. La rugosidad aceptable para los pavimentos se indica en la Tabla 7.14.

Tabla 7.14 Índice de regularidad internacional [10]

Medición	IRI
Promedio de 5 tramos consecutivos	Máximo 2,0 m/Km
Valor Individual	Máximo 2,8 m/Km

8. COMPARACIÓN DE ASPECTOS FUNCIONALES EN DRENABILIDAD Y EMISIÓN DE RUIDO DE RODADURA ENTRE LOS MDC Y CAS

8.1. Drenabilidad

Los MDC presentan una mayor macrotextura que las mezclas asfálticas tradicionales, mejorando la capacidad de drenaje superficial del pavimento y evitando la generación de una película de agua continua en la superficie, reduciendo tanto el deslizamiento en condiciones de lluvia (efecto de hidropilano) (Figura 8.1), como la reducción de rocío o *spray* de agua (Figura 8.2 y Figura 8.3) del vehículo que precede mientras se conduce [4].

La macrotextura de los microaglomerados tiene valores de altura de arena comprendidos entre 1,2 mm y 2 mm, a pesar de que las exigencias establecidas por el Manual de Carreteras define como mínimo 0,6 mm para toda carpeta de rodado [8]. Esta propiedad sirve para definir la rugosidad del pavimento y depende del tamaño máximo de la composición de la mezcla asfáltica. Entre mayor sea el tamaño del árido utilizado, más grande serán los huecos y los diámetros interconectados, mejorando la evacuación de agua en la interface neumático – pavimento, lo que se consigue con mezclas de granulometría discontinua como es el caso de los MDC [8]. Dentro de estas mezclas las que consiguen mayor drenabilidad superficial corresponden a las mezclas Tipo M, con huecos que oscilan entre 10% y 15% [10].

El espesor de la película de agua sobre el pavimento tiene directa relación con la intensidad y duración de la precipitación e inversa relación con la capacidad de drenaje del pavimento. La capacidad de evacuación de un pavimento se distribuye de dos formas: la primera mediante drenaje por infiltración, cuya agua es conducida a través de los huecos de aire que constituyen la carpeta de rodado y la segunda, que corresponde al sistema de los MDC y los CAS, por escorrentía superficial en donde el agua se desplaza longitudinal y transversalmente por la plataforma producto del bombeo hacia las obras de saneamiento que dispone el camino [6].

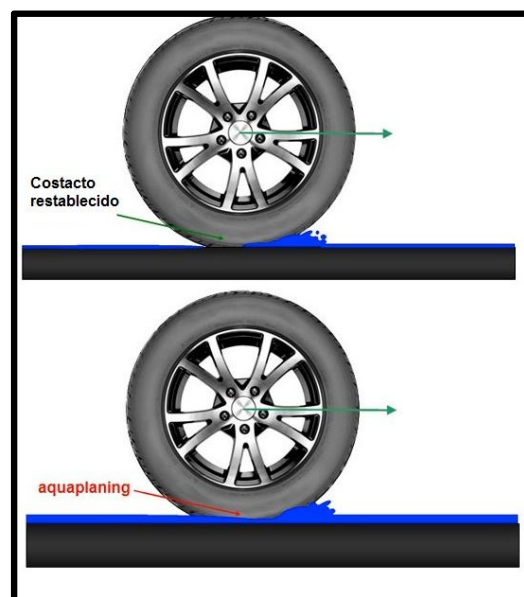


Figura 8.1 *Aquaplaning* y el restablecimiento del contacto con el pavimento [17]



Figura 8.2 Conducción con lluvia en MDC [20]



Figura 8.3 Conducción con lluvia en CAS [20]

8.2. Emisión de ruido de rodadura

La contaminación acústica ha adquirido cada vez más relevancia debido a que internacionalmente es reconocida como el contaminante más común y barato de producir, asimismo se presenta como un fenómeno que va en aumento, posicionándose como el segundo factor medioambiental de enfermedades más importantes, detrás de la contaminación atmosférica.

La unidad de medida de la intensidad del sonido es el decibel (dB), que corresponde a una unidad sin dimensión que expresa un determinado nivel de intensidad respecto a un nivel de referencia en escala logarítmica. El rango de audición está entre 0 dB (mínima intensidad del estímulo) y 120 dB (umbral de dolor). Las ciudades son los centros más afectados por el ruido, siendo uno de los más relevantes los provenientes del tráfico que representan aproximadamente el 80% del impacto acústico producido en la zona urbana, presentando niveles de ruidos que oscilan entre 35 dB y 85 dB, intervalo que en ocasiones sobrepasa los límites aceptables, provocando daños en la salud que se pueden manifestar en alteraciones del sueño, graves problemas auditivos y la activación de las hormonas de estrés que a su vez podrían afectar al sistema inmunológico y el metabolismo [7].

Dentro de las mezclas asfálticas utilizadas como carpetas de rodadura que buscan disminuir el impacto acústico, destacan los MDC. Estas mezclas sonorreductoras, disminuyen el ruido generado por la circulación de los vehículos, tanto para los ocupantes del medio de transporte como para el entorno influyendo en la calidad de vida de quienes habitan en zonas colindantes [18]. Esto se debe a que su textura superficial y conformación granulométrica generan mezclas menos densas y más abiertas [3]. La distribución de los agregados pétreos tiene una graduación de curva discontinua, con una proporción menor de áridos intermedios y finos, resultando un esqueleto granular con pocos puntos de contacto, generando así una mezcla con mayor cantidad de huecos de aire y una superficie lisa de macrotextura negativa (Figura 8.4), lo que disminuye la emisión de ruido generado por la compresión y descompresión de aire entre el neumático y la superficie del pavimento, amortiguando la emanación del sonido, favoreciendo a los MDC respecto a los CAS, por su mayor macrotextura superficial [19].

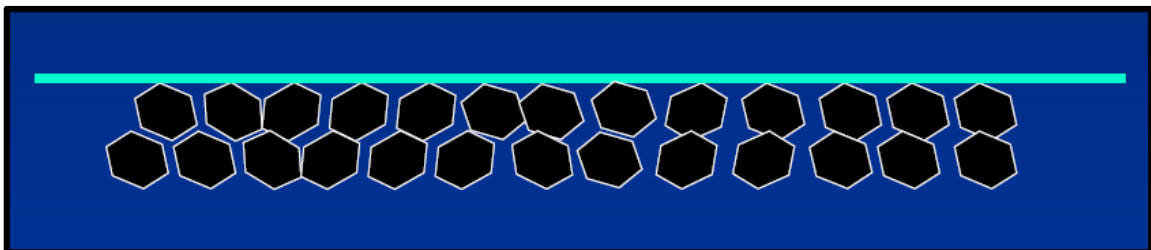


Figura 8.4 Macrotextura negativa de un pavimento [19]

Un estudio realizado en España demuestra las reducciones del nivel sonoro de los MDC respecto a los CAS. Esta disminución es de 1,5 dB a 2 dB en pavimento seco (Figura 8.5) y para pavimento mojado la situación es aún más favorable con una disminución de 2 dB a 5 dB [12][20].

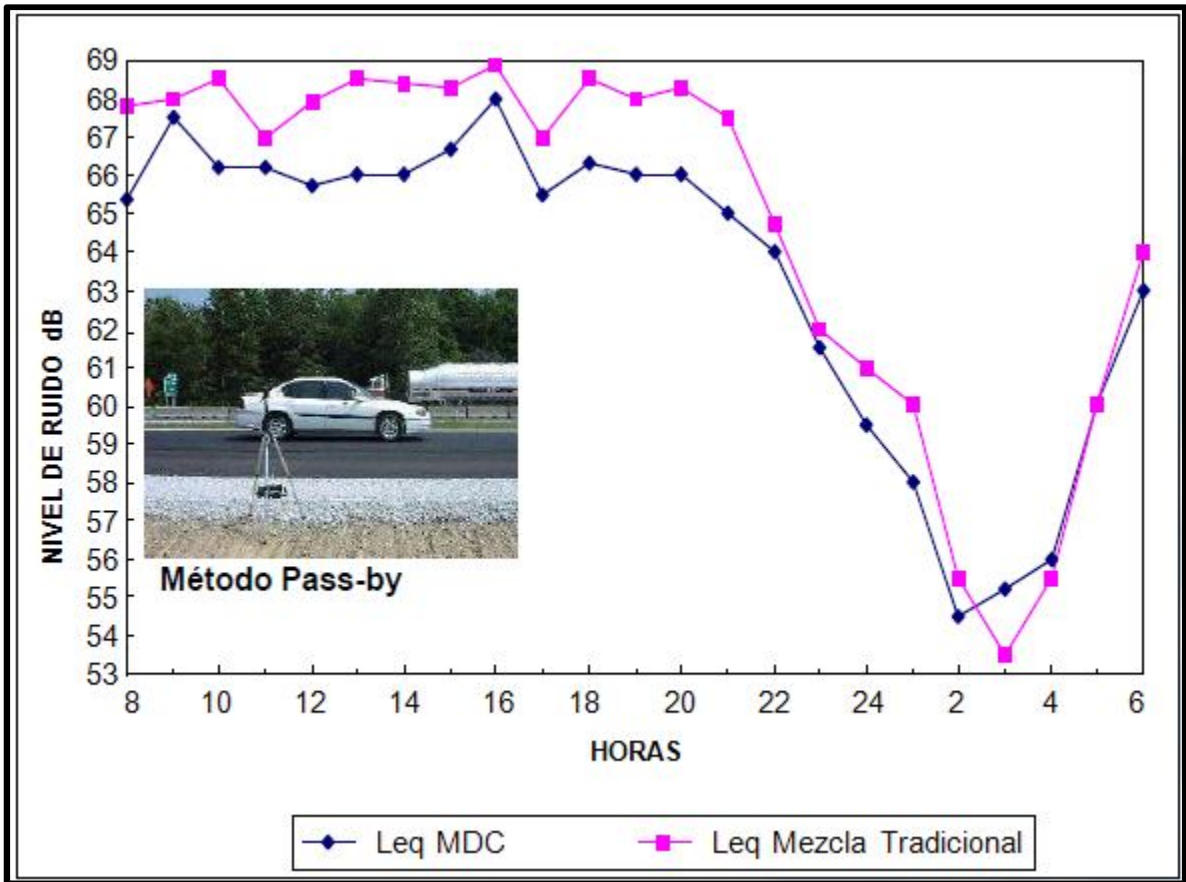


Figura 8.5 Disminución del ruido del tráfico mediante empleo de un MDC (II Cinturón. Ayuntamiento de Barcelona) [20]

9. CRITERIOS PARA DETERMINAR LAS VARIABLES DE DISEÑO

9.1. Número estructural

El método de diseño de pavimentos flexibles nuevos que se presenta en el Manual de Carreteras, está basado en el método AASHTO 93, con algunas precisiones y complementos para ajustarlo más a la realidad chilena. La fórmula general de diseño que relaciona la cantidad de ejes equivalentes (EE) solicitantes con el número estructural (NE) y el nivel de confianza, es la siguiente [21]:

$$EE = (NE + 25,4)^{9,36} * 10^{-(16,40+Z_R*S_0)} * M_R^{2,32} * [(pi - pf)/(pi - 1,5)]^{1/\beta} \quad \text{Ecuación 9.1}$$

$$\beta = 0,40 + [97,81/(NE + 25,4)]^{5,19} \quad \text{Ecuación 9.2}$$

Donde:

EE: Ejes equivalentes de 80 KN acumulados durante la vida de diseño.

NE: Número estructural (mm).

Z_R : Coeficiente estadístico que depende del nivel de confianza que se adopte.

S_0 : Desviación estándar del error combinado de todas las variables que intervienen en el modelo.

M_R : Módulo resiliente del suelo de la subrasante (MPa).

pi: Índice de serviciabilidad inicial.

pf: Índice de serviciabilidad final.

El Manual de Carreteras entrega rangos, recomendaciones y fórmulas empíricas para la determinación de las variables que influyen en el cálculo del número estructural, detalladas en los apartados posteriores [21]. Además de los coeficiente de drenajes (m_i) y coeficientes estructurales de las capas consideradas en el diseño, que permitirán generar las posteriores iteraciones para establecer la estructura de pavimento a proponer.

9.2. Serviciabilidad

La serviciabilidad de un camino no corresponde a una evaluación estrictamente funcional del mismo, sino que representa una condición de estado de éste en la cual se involucran aspectos funcionales y estructurales.

El pavimento se diseña para que preste servicio un tiempo determinado, periodo durante el cual la serviciabilidad se mantiene dentro de ciertos límites fijados por el diseñador que fluctúan entre 0 (pavimento intransitable) y 5 (pavimento perfecto).

Para efecto de diseño, los índices de serviciabilidad inicial y final para el diseño propuesto serán los recomendados por el manual de carreteras [21].

- Índice de serviciabilidad inicial (pi): 4.2
- Índice de serviciabilidad final (pf): 2.0

9.3. Solicitaciones

Las solicitudes inducidas al pavimento por el tránsito, son el factor individual más importante para establecer las dimensiones y características que debe tener un pavimento para soportar en condiciones adecuadas y por un periodo determinado, la amplia variedad de vehículos, de dimensiones, pesos, tipos y configuraciones de ruedas muy diferentes, que transmiten cargas de muy distinta índole y que se distribuyen de manera no uniforme a todo el ancho de la superficie pavimentada.

Como los vehículos livianos no contribuyen significativamente al daño estructural de las capas del pavimento, se consideran sólo los vehículos pesados para estimar la cantidad de solicitudes o ejes equivalentes (EE) acumulados durante el periodo de vida de diseño definido.

Para determinar los EE de diseño se requiere de la siguiente información:

- Período de diseño estructural
- Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) y Tasa de Crecimiento
- Estratigrafía de carga de vehículos pesados

9.3.1. Período de diseño estructural

El período de diseño estructural corresponde al período en el cual el pavimento construido debe proveer un adecuado nivel de servicio que asegure movilidad, accesibilidad y seguridad considerando sólo la conservación rutinaria. Para lo anterior, es indispensable que el pavimento posea estándares mínimos de conservación.

En la Tabla 9.1 se indica la vida de diseño utilizada según la clasificación del camino a proyectar.

Tabla 9.1 Vida de diseño [21]

Clasificación del Camino	Vida de Diseño (años)
De alto Tránsito en Zonas Urbanas	20 - 30
Caminos Nacionales	10 - 20
Regionales Principales	10 - 20
Regionales Secundarios	5 - 20

9.3.2. Tránsito medio diario anual y tasa de crecimiento

El TMDA es el indicador que define el total de vehículos que circula como promedio diario en un año. Si al TMDA se le resta el tránsito liviano, quedan sólo los camiones y buses, que son los que interesan para el diseño de los pavimentos. El tránsito pesado medio diario anual, TMDAC, es el indicador adecuado para calcular las solicitudes de diseño sólo cuando no existen variaciones estacionales significativas en los demás parámetros que intervienen en el comportamiento del pavimento, de lo contrario se deben considerar tasas de crecimiento o variación del volumen de tránsito en base a las tendencias históricas de los flujos, expresadas como proyecciones ligadas a variables macroeconómicas, tasas de motorización, entre otras. Las tasas de crecimiento recomendadas fluctúan entre el 4% y 7%.

9.3.3. Estratigrafía de carga

La estratigrafía de carga permite definir cuál es la real influencia que tiene cada tipo de vehículo sobre las solicitaciones totales de tránsito representadas por medio de los ejes equivalentes de tránsito. El peso del eje estándar está definido en 80 KN y permite transformar los diferentes ejes que circulan por una ruta, a un eje simple de rueda doble.

El factor de ejes equivalentes se expresa conceptualmente como sigue:

$$\text{Factor EE } x = \frac{(\text{Número de ejes de 80 kN que causan la misma pérdida de serviciabilidad})}{(\text{Número de ejes de X peso (kN) que causan una determinada pérdida de serviciabilidad})} \quad \text{Ecuación 9.3}$$

9.4. Nivel de confianza

El nivel de confianza puede definirse como la probabilidad de que el sistema estructural que conforma el pavimento cumpla su función prevista dentro de la vida útil proyectada.

El diseño se controla por el factor de confiabilidad (F_R), que es función de un valor asociado al nivel de confianza de la distribución normal (Z_R) y de la desviación normal del error combinado (S_0) de todos los parámetros que intervienen en el comportamiento del pavimento.

En la Tabla 9.2 se indican los valores que recomienda utilizar el Manual de Carreteras en función de las solicitaciones esperadas y del coeficiente de variación (coeficiente de variación = desviación estándar / promedio) de la serie de valores representativos de las características de los suelos de la subrasante.

Tabla 9.2 Nivel de confianza y valor de S_0 [21]

EE Solicitantes (Millones)	Confiabilidad (%)	Z_R	So en función del coeficiente variación de los suelos				
			15%	20%	30%	40%	50%
< 5	60	-0,253	0,45	0,46	0,47	0,49	0,5
5 - 15	60 - 70	-0,253 – 0,524	0,45	0,46	0,47	0,49	0,5
15 - 30	60 - 75	-0,253 – 0,674	0,45	0,46	0,47	0,49	0,5
30 - 50	70 - 80	-0,524 – 0,841	0,44	0,45	0,46	0,48	0,49
50 - 70	70 - 85	-0,524 – 1,037	0,42	0,43	0,44	0,47	0,48
70 - 90	70 - 90	-0,254 – 1,282	0,4	0,41	0,42	0,45	0,46

El diseño de pavimento flexible a proponer está destinado para un camino de bajo a mediano tránsito, por lo que sus EE solicitantes oscilarán entre 2 y 15 millones. Es por esto que las variables de diseño determinadas son válidas hasta niveles de tránsito de 15 millones de EE.

- Porcentaje de confiabilidad: 60%
- Distribución normal estándar (Z_R): -0.253
- Error combinado (S_0): 0.46

A continuación con los parámetros Z_R y S_0 antes definidos, se determinará el factor de confiabilidad (F_R) en base a la Ecuación 9.4.

$$F_R = 10^{(-Z_R * S_0)} \quad \text{ó} \quad \text{Log } F_R = -Z_R * S_0 \quad \text{Ecuación 9.4}$$

- Factor de Confiabilidad (F_R): 1.307

9.5. Módulo resiliente (M_R)

El módulo resiliente es el parámetro utilizado para representar las propiedades de los suelos de la subrasante en el diseño de pavimentos asfálticos según el método AASHTO. Se determina mediante un ensayo triaxial cíclico sobre una probeta sometida a una carga pulsante de duración definida. Una de las principales características de este ensayo es que numerosos estudios e investigaciones evidencian que los resultados que arroja son muy sensibles al estado de tensiones a que se encuentra sometido el suelo y que además, influyen factores tales como el contenido de humedad y el espesor de la capa que se analiza.

Normalmente resulta complicado ejecutar el ensayo descrito, puesto que se requiere de un equipo de laboratorio muy especial. En consecuencia, habitualmente se determina el módulo resiliente en forma indirecta, correlacionándolo con el ensayo CBR. Este es el procedimiento que se aplica en el Manual de Carreteras, sin embargo, debe tenerse presente que cualquier sistema de cálculo que no incluya las presiones de confinamiento, sólo puede considerarse como una aproximación al valor real.

Las relaciones utilizadas para calcular el módulo resiliente de los suelos que conforman la subrasante, son las siguientes [21]:

$$M_R \text{ (MPa)} = 17,6 \text{ (CBR)}^{0,64} \quad \text{Para CBR} < 12\% \quad \text{Ecuación 9.5}$$

$$M_R \text{ (MPa)} = 22,1 \text{ (CBR)}^{0,55} \quad \text{Para } 12\% \leq \text{CBR} < 80\% \quad \text{Ecuación 9.6}$$

A criterio propio y para efectos de diseño, se considerará que el suelo de la subrasante posee una capacidad soportante (CBR) de 13%. De forma posterior y en base a éste parámetro es posible determinar mediante la Ecuación 9.6 el módulo resiliente.

- Módulo Resiliente (M_R): 90.6 (MPa)

9.6. Coeficientes de drenaje (m_i)

La conveniencia de drenar el agua fuera de la estructura del pavimento, ha sido un factor que siempre se ha considerado en forma preponderante en el diseño de un camino, a pesar que normalmente las bases que se construyen no drenan bien. El exceso de agua que se origina, unido a la alta frecuencia y peso de las cargas solicitantes, llevan con frecuencia a deterioros prematuros de la estructura, por lo que el método de diseño AASHTO considera directamente los efectos del contenido de humedad en los suelos de la subrasante, bases y subbases. Es por esto, que el coeficiente de drenaje tiene la finalidad de ajustar el coeficiente estructural de las capas granulares no tratadas, en función de las condiciones del drenaje del proyecto que se analiza.

Los coeficientes de drenaje a utilizar dependen tanto de la calidad del drenaje como del tiempo durante el cual la estructura de pavimento se verá expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación, en la práctica con más de 50% de humedad. El tiempo de saturación depende de la calidad del drenaje y también de la distribución y frecuencia de las precipitaciones que caracterizan la zona donde se localiza el proyecto que se analiza.

En la Tabla 9.3, se muestran los coeficientes de drenaje que se proponen a nivel nacional:

Tabla 9.3 Coeficiente de drenaje [21]

Región	Precipitación	Base Permeable	Base: Finos hasta 10 %		Base: Más 10 % finos	
			Subrasante granular	Subrasante finos	Subrasante granular	Subrasante finos
IV	≤ 100 mm	1,4 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,05
	> 100 mm	1,4 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,15 - 1,00	1,05 - 0,80
V a VI	≤ 150 mm	1,4 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,15 - 1,00	1,00
	> 150 mm	1,4 - 1,35	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,00	1,00 - 0,80
VII a IX	≤ 350 mm	1,4 - 1,35	1,35 - 1,25	1,35 - 1,25	1,00	0,80
	> 350 mm	1,4 - 1,35	1,25 - 1,15	1,25 - 1,15	1,00 - 0,80	0,80
X	≤ 1500 mm	1,4 - 1,35	1,25 - 1,15	1,15	1,00 - 0,80	0,80 - 0,60
	> 1500 mm	1,35 - 1,3	1,15 - 1,00	1,15 - 1,00	0,80	0,60
XI y XII	≤ 500 mm	1,4 - 1,35	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,00	1,00 - 0,80
	> 500 mm	1,4 - 1,35	1,25 - 1,15	1,15	0,80	0,80

Base permeable: menos de 3% de finos y/o coeficiente de permeabilidad > 0,01 cm/s
Subrasante granular: Máximo 35% pasa tamiz de 0,08 mm

Los parámetros adoptados para los coeficiente de drenajes para la base y sub-base granular basados en el lugar de emplazamiento del diseño proyectado se indican a continuación.

- Coeficiente de drenaje base granular (m_i): 1
- Coeficiente de drenaje base sub-granular (m_i):1

9.7. Coeficientes estructurales (a_i)

La versión 1993 del método AASHTO enfatiza la conveniencia de asignar el coeficiente estructural adecuado a cada capa de pavimento, considerando las propiedades reales de los materiales que la constituyen. El coeficiente estructural depende directamente del módulo elástico del material que compone la capa, por lo que la mejor manera de obtenerlo es a través de esa propiedad, sin embargo, existen métodos indirectos o relaciones que permiten estimar coeficientes estructurales en función de la estabilidad Marshall, correlaciones con el CBR, entre otros.

En la Tabla 9.4 se indican los coeficientes estructurales que recomienda el Manual de Carreteras para las diferentes capas de pavimento.

Tabla 9.4 Coeficientes estructurales [21]

Capa	Características	Coeficiente Estructural (a _i)
Sub-base Granular	CBR = 40%	0,12
Base Granular	CBR = 80%	0,13
Base Asfáltica Grad. Gruesa	6.000 N	0,33
Base Asfáltica Grad. Abierta		0,28
Grava – emulsión		0,30
C. Asfáltico, Capa Intermedia	8.000 N	0,41
C. Asfáltico de Superficie	9.000 N	0,43
Mezclas drenantes		0,32
Microaglomerados discontinuos en calientes		0,40
Mezclas SMA (<i>Stone Mastic Asphalt</i>)		0,43

Las capas estructurales consideradas para el diseño de pavimento flexible con sus respectivos coeficientes estructurales son los siguientes:

Capas Asfálticas:

- Concreto Asfáltico de Superficie (CAS): 0,43
- Microaglomerados Discontinuos en Caliente (MDC): 0,4
- Carpeta Asfáltica Intermedia (binder): 0,41

Capas Granulares:

- Base Granular: 0,13
- Sub-base Granular: 0,12

9.8. Temperatura media anual ponderada del aire (TMAPA)

La TMAPA se obtiene a partir de temperaturas medias mensuales del aire (TMMA) de la zona donde se emplaza el camino. Posteriormente se confecciona una tabla, en la que para la TMMA de cada uno de los meses del año, se determina el factor de ponderación (W_i) mediante la Ecuación 9.7.

$$TMMA (^{\circ}C) = 20,348 + 17,5683 * \log W_i$$

Ecuación 9.7

Por último, TMAPA se determina calculando el factor de ponderación promedio del año (W_{ip}), que se introduce en la misma Ecuación 9.7 pero a la inversa, obteniendo la TMAPA, la que se detalla en la Tabla 9.5.

Tabla 9.5 Cálculo de la temperatura media anual ponderada del aire (TMAPA) [21]

Mes	TMMA (°C ₁)	Wi
Enero	17,0	0,64480
Febrero	16,8	0,62812
Marzo	15,6	0,53671
Abril	14,2	0,44674
Mayo	13,3	0,39703
Junio	12,0	0,33483
Julio	11,4	0,30951
Agosto	11,7	0,32192
Septiembre	12,1	0,33925
Octubre	13,2	0,39186
Noviembre	14,7	0,47699
Diciembre	16,2	0,58062
	Suma	5,40838
	Promedio (Wip) = 5,40838/12	0,45070
	TMAPA	14,2 °C

1.- TMMA considerada (Valparaíso - Punta Ángeles)

Nota: Para efectos de diseño se considera TMAPA = 14 °C.

Finalmente se resumen las variables de diseño determinadas por medio de los cálculos indicados anteriormente en la Tabla 9.6.

Tabla 9.6 Resumen variables de diseño

Variables de diseño	Simbología	Valor
Índice de Serviciabilidad Inicial	pi	4,2
Índice de Serviciabilidad Final	pf	2,0
Capacidad de Soporte de Suelo (%)	CBR	13
Módulo Resiliente (MPa)	M _R	90,6
Nivel de Confianza (%)		60
Distribución Normal Estándar	Z _R	-0,253
Error Combinado	S ₀	0,46
Coefficiente de Drenaje en Base		1
Coefficiente de Drenaje en Sub base		1
Temperatura Media Anual Ponderada del Aire (°C)	TMAPA	14
Capa	Simbología	Coefficiente Estructural
Concreto Asfáltico de Superficie (CAS)	a _i	0,43
Microaglomerado Discontinuo en Caliente (MDC)		0,40
Concreto Asfáltico, Capa Intermedia (binder)		0,41
Base Granular (CBR = 80%)		0,13
Subbase Granular (CBR = 40%)		0,12

10. DETERMINACIÓN DEL DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE

Un pavimento flexible es un sistema multicapa y por lo tanto, debe diseñarse como tal. Esto implica una secuencia de capas que a partir de la subrasante contemple una sub-base, una base y la o las capas asfálticas.

En esta sección se propone un diseño de pavimento flexible alternativo, que sea capaz de mejorar las propiedades funcionales de los pavimentos tradicionales. Estas propiedades dependen exclusivamente de las carpetas de rodado (CAS y MDC), ambas poseen distintos coeficientes estructurales que se compensan modificando el espesor del binder. Por esta razón se utilizó el mismo patrón de capas granulares y subrasantes en los distintos diseños analizados (Figura 10.1).

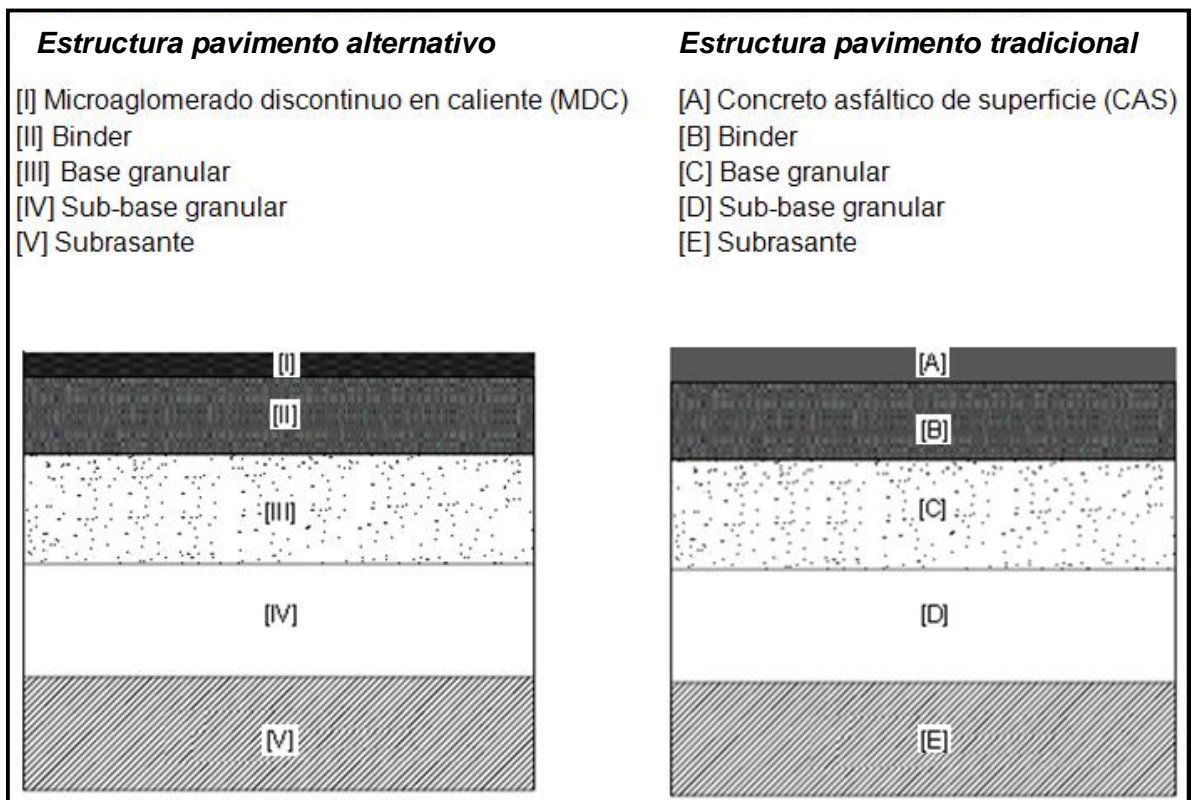


Figura 10.1 Estructuras de pavimento flexible

Para el diseño se consideraron 150 mm para bases y sub-bases granulares, espesor mínimo establecido por el Manual de Carreteras, y una subrasante de CBR 13% para efectos de diseño. Estas condiciones se mantuvieron constantes para el análisis, ya que el fin es proponer la utilización de los MDC como aporte al número estructural a nivel de capas asfálticas, independiente de las capas subyacentes.

Se establecieron los límites de iteración del binder en un mínimo de 50 mm según el Manual de Carreteras y un máximo de 100 mm, que corresponde al máximo espesor posible de compactar en una sola capa. Si el binder se aplica en mayor espesor, se requiere obligatoriamente compactar en

dos o más capas, impidiendo la comparación equitativa desde el punto de vista constructivo, ya que, repetir el proceso de extensión y compactación de la capa de binder encarecería el diseño a pesar de ser estructuralmente equivalentes.

Los números estructurales dispuestos a nivel de base (NE_A) y a nivel total (NE_T) para las posibles combinaciones CAS + binder, se determinaron utilizando la Ecuación 10.1 y Ecuación 10.2 manteniendo constante el CAS en un espesor de 50 mm y modificando el binder en un aumento constante de 5 mm, por razones constructivas y para evitar la proliferación excesiva de diseños. Cabe destacar, que para el cálculo del $NE_{A \text{ DISPUESTO}}$ se utilizaron sólo las carpetas asfálticas, sin embargo, para la determinación $NE_{T \text{ DISPUESTO}}$ fueron consideradas todas las carpetas estructurales que componen el pavimento incluyendo bases y sub-bases granulares, aportando una capacidad soportante constante en los diseños iterados [21].

$$NE_{A \text{ DISPUESTO}} = a_1 * h_1 + a_2 * h_2 \quad (1) \quad \text{Ecuación 10.1}$$

$$NE_{T \text{ DISPUESTO}} = a_1 * h_1 + a_2 * h_2 + a_3 * m_3 * h_3 + a_4 * m_4 * h_4 \quad (2) \quad \text{Ecuación 10.2}$$

⁽¹⁾⁽²⁾ En la Tabla 10.1 se resumen los valores utilizados en la determinación de $NE_{A \text{ DISPUESTO}}$ y $NE_{T \text{ DISPUESTO}}$ definidos en apartados anteriores.

Donde:

NE: número estructural.

a_i : coeficientes estructurales de las diversas capas.

h_i : espesores de las capas (mm).

m_i : coeficientes de drenaje de las capas no tratadas.

Tabla 10.1 Valores de las variables utilizadas para el cálculo de $NE_{A \text{ DISPUESTO}}$ y $NE_{T \text{ DISPUESTO}}$

Variable	Simbología	CAS	MDC	Binder	Base granular (CBR=40%)	Sub-base granular (CBR=80%)
Coficiente estructural	a_i	0,43	0,40	0,41	0,13	0,12
Espesor capa (mm)	h_i	50	25	50 - 100	150	150
Coficiente de drenaje	m_i	-	-	-	1	1

En la Tabla 10.2 se detallan los resultados obtenidos.

Tabla 10.2 Números estructurales dispuestos para los diseños CAS + binder

Pavimento Tradicional (CAS + binder)						
Iteración	Espesor (mm)				NE _{DISPUESTO}	
	CAS	Binder	Base granular	Sub-base granular	NE _A DISPUESTO	NE _T DISPUESTO
1	50	50	150	150	42	80
2	50	55	150	150	44	82
3	50	60	150	150	46	84
4	50	65	150	150	48	86
5	50	70	150	150	50	88
6	50	75	150	150	52	90
7	50	80	150	150	54	92
8	50	85	150	150	56	94
9	50	90	150	150	58	96
10	50	95	150	150	60	98
11	50	100	150	150	63	100

Los números estructurales dispuestos NE_A y NE_T para las posibles combinaciones MDC + binder, se determinaron utilizando la Ecuación 10.1 y Ecuación 10.2 manteniendo constante el MDC en un espesor de 25 mm, valor adoptado según tamaño máximo de árido en mezcla establecido por el Manual de Carreteras y su mayor costo respecto a los CAS. Al igual que para las combinaciones anteriores se fue modificando el binder en un aumento constante de 5 mm, por razones constructivas y para evitar la proliferación excesiva de diseños [21]. En la Tabla 10.3 se detallan los resultados obtenidos.

Tabla 10.3 Números estructurales dispuestos para los diseños MDC + binder

Pavimento Alternativo (MDC + binder)						
Iteración	Espesor (mm)				NE DISPUESTO	
	MDC	Binder	Base granular	Sub-base granular	NE _A DISPUESTO	NE _T DISPUESTO
1	25	50	150	150	31	68
2	25	55	150	150	33	70
3	25	60	150	150	35	72
4	25	65	150	150	37	74
5	25	70	150	150	39	76
6	25	75	150	150	41	78
7	25	80	150	150	43	80
8	25	85	150	150	45	82
9	25	90	150	150	47	84
10	25	95	150	150	49	86
11	25	100	150	150	51	89

Utilizando el método de diseño AASHTO y el programa computacional PAVIVIAL versión 1.0, dispuestos en el Manual de Carreteras, se determinaron los números estructurales requeridos NE_A y NE_T para diferentes solicitaciones de tránsito partiendo desde 500.000 EE, ya que es la mínima solicitud que se aproxima a los números estructurales dispuestos obtenidos en la Tabla 10.2 y Tabla 10.3. Para esto se incrementó de forma constante en 500.000 EE, hasta alcanzar el valor máximo permitido para los números estructurales dispuestos en los diseños iterados MDC + binder, que corresponden a NE_A de 51 y un NE_T de 89.

Los números estructurales requeridos NE_A y NE_T para diferentes solicitaciones de tránsito se detallan en la Tabla 10.4.

Tabla 10.4 Números estructurales requeridos NE_A y NE_T para diferentes EE

EE Solicitantes (miles)	NE_A REQUERIDO	NE_T REQUERIDO
500	31	53
1000	35	59
1500	38	63
2000	40	66
2500	42	68
3000	44	70
3500	45	72
4000	46	73
4500	47	75
5000	48	76
5500	49	77
6000	50	78

En base a los números estructurales dispuestos determinados en la Tabla 10.2 y Tabla 10.3, se seleccionaron los diseños CAS + binder y MDC + binder equivalentes, que cumplan con el mínimo número estructural requerido para las distintas solicitudes de tránsito determinados en la Tabla 10.4, cumpliendo lo siguiente:

- NE_A DISPUESTO > NE_A REQUERIDO
- NE_T DISPUESTO > NE_T REQUERIDO

Los diseños comparados lograron tener similar capacidad estructural a los 2 millones de EE, ya que a este nivel de solicitud, el espesor del binder logra equiparar la deficiencia estructural del MDC respecto al CAS, el que se aumentó en forma constante hasta solucionar el mayor nivel de tránsito permitido correspondiente a 6 millones de EE, llegando al máximo de iteraciones permitidas según los alcances establecidos.

La Tabla 10.5 resume los diseños CAS + binder y MDC binder equivalentes y se muestran en la Figura 10.2.

Tabla 10.5 Diseños equivalentes entre CAS + binder y MDC + binder

EE Solicitantes (miles)	NE REQUERIDOS		Pavimento Tradicional (CAS + binder) NE DISPUESTOS			Pavimento Alternativo (MDC + binder) NE DISPUESTOS		
	NE _A	NE _T	Espesor binder (mm)	NE _A	NE _T	Espesor binder (mm)	NE _A	NE _T
2000	40	66	50	42	80	75	41	78
2500	42	68	55	44	82	80	43	80
3000	44	70	60	46	84	85	45	82
3500	45	72	65	48	86	90	47	84
4000	46	73	65	48	86	90	47	84
4500	47	75	70	50	88	95	49	86
5000	48	76	70	50	88	95	49	86
5500	49	77	75	52	90	100	51	89
6000	50	78	75	52	90	100	51	89

Nota: Distintas solicitaciones de tránsito pueden ser resistidas por una misma estructura de pavimento, puesto que el método de diseño empleado establece una discreción constructiva para las capas utilizadas.

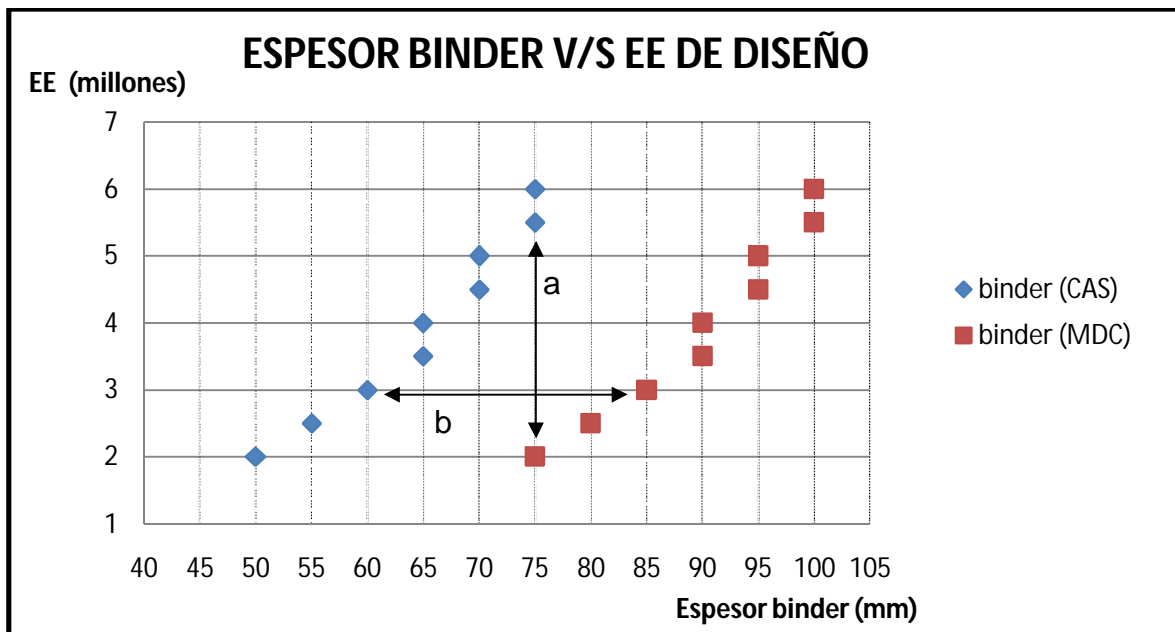


Figura 10.2 Espesor de binder necesarios para diferentes EE

Como se muestra en la gráfica, es posible obtener una similar capacidad soportante en diseños CAS + binder y MDC + binder, ejemplo de ello es lo que ocurre a solicitaciones de 6 millones de EE, donde la estructura tradicional requiere un CAS de 50 mm y un binder de 75 mm, mientras que el diseño alternativo demanda un MDC de 25 mm y un binder de 100 mm. La diferencia del

espesor del binder es de 25 mm, siendo éste el aporte estructural que logra compensar la deficiencia estructural del MDC respecto al CAS.

La diferencia de ordenada (a) entre las curvas CAS + binder y MDC + binder, muestran la diferencia de capacidad estructural que debe ser suplida con un espesor adicional de binder. Para lograr un diseño MDC + binder equivalente a un CAS + binder, en este trabajo, se puede conseguir en un rango de 4 millones de EE (entre 2 millones y 6 millones de EE).

La distancia (b) indica el espesor que se debe agregar a el diseño MDC + binder para lograr una estructura equivalente a la solución CAS + binder. En este rango de trabajo corresponde a 25 mm de binder.

Cabe mencionar que los diseños analizados no siguen una línea de tendencia, siendo imposible matemáticamente obtener espesores de binder intermedios para solicitaciones de tránsito intermedias. Por otra parte, el método de diseño empleado establece una discreción constructiva para las capas asfálticas las cuales deben aproximarse a los 5 mm, por razones constructivas y para evitar la proliferación excesiva de diseños, recomendación estipulada en el Manual de Carreteras.

A continuación, se determinan diseños equivalentes para solicitaciones menores a 2 millones de EE y mayores a 6 millones de EE, con el fin de proyectar el estudio y demostrar que fuera del rango analizado, los diseños no logran ser competitivos por una variación e incremento de los costos.

Para solicitaciones de tránsito menores a 2 millones de EE no se logra obtener diseños con capacidad soportante similar entre MDC + binder y CAS + binder, debido a que los coeficientes estructurales de las carpetas de rodado son diferentes y no aportan en la misma razón al número estructural, esto implica necesariamente disminuir el espesor de binder bajo los 50 mm, manteniendo el CAS en el mínimo espesor posible de construir. Aún cuando teóricamente se puede determinar el espesor necesario de binder para este nivel de solicitaciones, constructivamente es imposible lograr. Es por esto, que para encontrar diseños equivalentes a menores niveles de tránsito, se requiere aumentar el espesor del CAS hasta igualar el mínimo número estructural dispuesto para los diseños MDC + binder (Tabla 10.3), En la Tabla 10.6 se detalla los diseños equivalentes entre CAS y MDC + binder para solicitaciones de carga menor a 2 millones de EE.

Tabla 10.6 Diseños equivalentes entre CAS y MDC + binder

EE Solicitantes (miles)	NE REQUERIDOS		Pavimento Tradicional (CAS) NE DISPUESTOS			Pavimento Alternativo (MDC + binder) NE DISPUESTOS		
	NE _A	NE _T	Espesor CAS (mm)	NE _A	NE _T	Espesor binder (mm)	NE _A	NE _T
500	31	53	75	32	70	55	33	70
1000	35	59	85	37	74	65	37	74

En el caso de solicitudes de tránsito mayores a 6 millones de EE, es posible obtener diseños con similar capacidad soportante entre CAS + binder y MDC + binder. Para esto, se requiere aumentar el binder por sobre los 100 mm de espesor, lo que implica extender y compactar en dos o más capas aumentando los costos constructivos. Los diseños equivalentes para solicitudes mayores a 6 millones se detallan en la Tabla 10.7.

Para efectos de análisis, se considerará que el costo constructivo de la extensión y compactación de la segunda capa de binder, será igual al precio de los materiales de dicho espesor necesario para soportar solicitudes superiores a los 6 millones de EE.

Tabla 10.7 Diseños equivalentes entre CAS + binder y MDC + binder

EE Solicitantes (miles)	NE REQUERIDOS		Pavimento Tradicional (CAS + binder) NE DISPUESTOS			Pavimento Alternativo (MDC + binder) NE DISPUESTOS		
	NE _A	NE _T	Espesor binder (mm)	NE _A	NE _T	Espesor binder (mm)	NE _A	NE _T
7000	51	80	75	52	90	105	53	91
9000	53	83	80	54	92	110	55	93
15000	59	90	95	60	98	125	61	99

11. COMPARACIÓN DE COSTOS DE MATERIALES DE LOS DISEÑOS EQUIVALENTES

Se determinaron los costos por kilómetro de camino con un ancho de plataforma de 10 m para los distintos diseños equivalentes obtenidos, donde se consideraron los precios por m^3 asociados a las capas asfálticas y a las capas granulares. El detalle de los costos para los distintos diseños se muestran entre la Tabla 11.1 - Tabla 11.28 y se resumen en la Tabla 11.29, 11.30 y 11.31.

Los precios definidos para los materiales de las capas asfálticas y capas granulares considerados son los siguientes:

Capas asfálticas:

- Concreto Asfáltico de Superficie: 76.500 (\$/m³).
- Microaglomerado Discontinuo en Caliente: 100.000 (\$/m³).
- Carpeta Intermedia (binder): 67.000 (\$/m³).

Capas granulares:

- Base Granular (CBR = 80%): 3.500 (\$/m³)
- Sub-base Granular (CBR = 40%): 3000 (\$/m³)

Nota: Los precios de los materiales fueron cotizados telefónicamente en la empresa Bitumix en Octubre de 2014.

Tabla 11.1 Costo de materiales para 2 millones de EE - pavimento tradicional

Costos de materiales - Pavimento Tradicional						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Precio Venta (\$/m ³)	Costo Parcial (\$)
CAS	0,05	10	1.000	500	76.500	38.250.000
binder	0,05	10	1.000	500	67.000	33.500.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						81.500.000

Tabla 11.2 Costo de materiales para 2 millones de EE - pavimento alternativo

Costos de materiales - Pavimento Alternativo						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Precio Venta (\$/m ³)	Costo Parcial (\$)
MDC	0,025	10	1.000	250	100.000	25.000.000
binder	0,075	10	1.000	750	67.000	50.250.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						85.000.000

Tabla 11.3 Costo de materiales para 2,5 millones de EE - pavimento tradicional

Costos de materiales - Pavimento Tradicional						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Precio Venta (\$/m ³)	Costo Parcial (\$)
CAS	0,05	10	1.000	500	76.500	38.250.000
binder	0,055	10	1.000	550	67.000	36.850.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						84.850.000

Tabla 11.4 Costo de materiales para 2,5 millones de EE - pavimento alternativo

Costos de materiales - Pavimento Alternativo						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m³)	Precio Venta (\$/m³)	Costo Parcial (\$)
MDC	0,025	10	1.000	250	100.000	25.000.000
binder	0,08	10	1.000	800	67.000	53.600.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						88.350.000

Tabla 11.5 Costo de materiales para 3 millones de EE - pavimento tradicional

Costos de materiales - Pavimento Tradicional						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m³)	Precio Venta (\$/m³)	Costo Parcial (\$)
CAS	0,05	10	1.000	500	76.500	38.250.000
binder	0,06	10	1.000	600	67.000	40.200.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						88.200.000

Tabla 11.6 Costo de materiales para 3 millones de EE - pavimento alternativo

Costos de materiales - Pavimento Alternativo						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m³)	Precio Venta (\$/m³)	Costo Parcial (\$)
MDC	0,025	10	1.000	250	100.000	25.000.000
binder	0,085	10	1.000	850	67.000	56.950.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						91.700.000

Tabla 11.7 Costo de materiales para 3,5 millones de EE - pavimento tradicional

Costos de materiales - Pavimento Tradicional						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m³)	Precio Venta (\$/m³)	Costo Parcial (\$)
CAS	0,05	10	1.000	500	76.500	38.250.000
binder	0,065	10	1.000	650	67.000	43.550.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						91.550.000

Tabla 11.8 Costo de materiales para 3,5 millones de EE - pavimento alternativo

Costos de materiales - Pavimento Alternativo						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m³)	Precio Venta (\$/m³)	Costo Parcial (\$)
MDC	0,025	10	1.000	250	100.000	25.000.000
binder	0,09	10	1.000	900	67.000	60.300.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						95.050.000

Tabla 11.9 Costo de materiales para 4 millones de EE - pavimento tradicional

Costos de materiales - Pavimento Tradicional						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m³)	Precio Venta (\$/m³)	Costo Parcial (\$)
CAS	0,05	10	1.000	500	76.500	38.250.000
binder	0,065	10	1.000	650	67.000	43.550.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						91.550.000

Tabla 11.10 Costo de materiales para 4 millones de EE - pavimento alternativo

Costos de materiales - Pavimento Alternativo						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m³)	Precio Venta (\$/m³)	Costo Parcial (\$)
MDC	0,025	10	1.000	250	100.000	25.000.000
binder	0,09	10	1.000	900	67.000	60.300.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						95.050.000

Tabla 11.11 Costo de materiales para 4,5 millones de EE - pavimento tradicional

Costos de materiales - Pavimento Tradicional						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m³)	Precio Venta (\$/m³)	Costo Parcial (\$)
CAS	0,05	10	1.000	500	76.500	38.250.000
binder	0,07	10	1.000	700	67.000	46.900.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						94.900.000

Tabla 11.12 Costo de materiales para 4,5 millones de EE - pavimento alternativo

Costos de materiales - Pavimento Alternativo						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m³)	Precio Venta (\$/m³)	Costo Parcial (\$)
MDC	0,025	10	1.000	250	100.000	25.000.000
binder	0,095	10	1.000	950	67.000	63.650.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						98.400.000

Tabla 11.13 Costo de materiales para 5 millones de EE - pavimento tradicional

Costos de materiales - Pavimento Tradicional						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Precio Venta (\$/m ³)	Costo Parcial (\$)
CAS	0,05	10	1.000	500	76.500	38.250.000
binder	0,07	10	1.000	700	67.000	46.900.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						94.900.000

Tabla 11.14 Costo de materiales para 5 millones de EE - pavimento alternativo

Costos de materiales - Pavimento Alternativo						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Precio Venta (\$/m ³)	Costo Parcial (\$)
MDC	0,025	10	1.000	250	100.000	25.000.000
binder	0,095	10	1.000	950	67.000	63.650.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						98.400.000

Tabla 11.15 Costo de materiales para 5,5 millones de EE - pavimento tradicional

Costos de materiales - Pavimento Tradicional						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Precio Venta (\$/m ³)	Costo Parcial (\$)
CAS	0,05	10	1.000	500	76.500	38.250.000
binder	0,075	10	1.000	750	67.000	50.250.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						98.250.000

Tabla 11.16 Costo de materiales para 5,5 millones de EE - pavimento alternativo

Costos de materiales - Pavimento Alternativo						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Precio Venta (\$/m ³)	Costo Parcial (\$)
MDC	0,025	10	1.000	250	100.000	25.000.000
binder	0,1	10	1.000	1000	67.000	67.000.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						101.750.000

Tabla 11.17 Costo de materiales para 6 millones de EE - pavimento tradicional

Costos de materiales - Pavimento Tradicional						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Precio Venta (\$/m ³)	Costo Parcial (\$)
CAS	0,05	10	1.000	500	76.500	38.250.000
binder	0,075	10	1.000	750	67.000	50.250.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						98.250.000

Tabla 11.18 Costo de materiales para 6 millones de EE - pavimento alternativo

Costos de materiales - Pavimento Alternativo						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Precio Venta (\$/m ³)	Costo Parcial (\$)
MDC	0,025	10	1.000	250	100.000	25.000.000
binder	0,1	10	1.000	1000	67.000	67.000.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						101.750.000

Tabla 11.19 Costo de materiales para 500.000 EE - pavimento tradicional

Costos de materiales - Pavimento Tradicional						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Precio Venta (\$/m ³)	Costo Parcial (\$)
CAS	0,075	10	1.000	750	76.500	57.375.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						67.125.000

Tabla 11.20 Costo de materiales para 500.000 EE - pavimento alternativo

Costos de materiales - Pavimento Alternativo						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Precio Venta (\$/m ³)	Costo Parcial (\$)
MDC	0,025	10	1.000	250	100.000	25.000.000
binder	0,055	10	1.000	550	67.000	36.850.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						71.600.000

Tabla 11.21 Costo de materiales para 1 millón de EE - pavimento tradicional

Costos de materiales - Pavimento Tradicional						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Precio Venta (\$/m ³)	Costo Parcial (\$)
CAS	0,085	10	1.000	850	76.500	65.025.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						74.775.000

Tabla 11.22 Costo de materiales para 1 millón de EE - pavimento alternativo

Costos de materiales - Pavimento Alternativo						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Precio Venta (\$/m ³)	Costo Parcial (\$)
MDC	0,025	10	1.000	250	100.000	25.000.000
binder	0,065	10	1.000	650	67.000	43.550.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						78.300.000

Tabla 11.23 Costo de materiales para 7 millones de EE - pavimento tradicional

Costos de materiales - Pavimento Tradicional						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Precio Venta (\$/m ³)	Costo Parcial (\$)
CAS	0,05	10	1.000	500	76.500	38.250.000
binder	0,075	10	1.000	750	67.000	50.250.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						98.250.000

Tabla 11.24 Costo de materiales para 7 millones de EE - pavimento alternativo

Costos de materiales - Pavimento Alternativo						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m ³)	Precio Venta (\$/m ³)	Costo Parcial (\$)
MDC	0,025	10	1.000	250	100.000	25.000.000
binder (capa 1)	0,1	10	1.000	1000	67.000	67.000.000
binder (capa 2)	0,005	10	1.000	50	67.000	3.350.000
costos constructivos (capa 2)	0,005	10	1.000	50	67.000	3.350.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						108.450.000

Tabla 11.25 Costo de materiales para 9 millones de EE - pavimento tradicional

Costos de materiales - Pavimento Tradicional						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m³)	Precio Venta (\$/m³)	Costo Parcial (\$)
CAS	0,05	10	1.000	500	76.500	38.250.000
binder	0,08	10	1.000	800	67.000	53.600.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						101.600.000

Tabla 11.26 Costo de materiales para 9 millones de EE - pavimento alternativo

Costos de materiales - Pavimento Alternativo						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m³)	Precio Venta (\$/m³)	Costo Parcial (\$)
MDC	0,025	10	1.000	250	100.000	25.000.000
binder (capa 1)	0,1	10	1.000	1000	67.000	67.000.000
binder (capa 2)	0,01	10	1.000	100	67.000	6.700.000
costos constructivos (capa 2)	0,01	10	1.000	100	67.000	6.700.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						115.150.000

Tabla 11.27 Costo de materiales para 15 millones de EE - pavimento tradicional

Costos de materiales - Pavimento Tradicional						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m³)	Precio Venta (\$/m³)	Costo Parcial (\$)
CAS	0,05	10	1.000	500	76.500	38.250.000
binder	0,095	10	1.000	950	67.000	63.650.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						111.650.000

Tabla 11.28 Costo de materiales para 15 millones de EE - pavimento alternativo

Costos de materiales - Pavimento Alternativo						
Carpeta	Espesor (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Volumen (m³)	Precio Venta (\$/m³)	Costo Parcial (\$)
MDC	0,025	10	1.000	250	100.000	25.000.000
binder (capa 1)	0,1	10	1.000	1000	67.000	67.000.000
binder (capa 2)	0,025	10	1.000	250	67.000	16.750.000
costos constructivos (capa 2)	0,025	10	1.000	250	67.000	16.750.000
base granular (CBR = 80%)	0,15	10	1.000	1500	3.500	5.250.000
sub-base granular (CBR = 40%)	0,15	10	1.000	1500	3.000	4.500.000
Costo Total (\$)						135.250.000

Tabla 11.29 Resumen costos materiales diseños equivalentes entre 2 y 6 millones de EE

EE (millones)	CAS + binder	MDC + binder
2	81.500.000	85.000.000
2,5	84.850.000	88.350.000
3	88.200.000	91.700.000
3,5	91.550.000	95.050.000
4	91.550.000	95.050.000
4,5	94.900.000	98.400.000
5	94.900.000	98.400.000
5,5	98.250.000	101.750.000
6	98.250.000	101.750.000

Tabla 11.30 Resumen costos materiales diseños equivalentes menores a 2 millones de EE

EE (millones)	CAS	MDC + binder
0,5	67.125.000	71.600.000
1	74.775.000	78.300.000

Tabla 11.31 Resumen costos materiales diseños equivalentes mayores a 6 millones de EE

EE (millones)	CAS + binder	MDC + binder
7	98.250.000	108.450.000
9	101.600.000	115.150.000
15	111.650.000	135.250.000

En la Figura 11.1, sólo se considera para efectos de análisis, el costo variable total de las mezclas asfálticas utilizadas para cada diseño, que se obtiene del producto del precio por metro cúbico de cada mezcla y volumen de aplicación [$CV_T = (\$/m^3) * m^3$], sin considerar los costos fijos asociados. A continuación se muestra la tendencia de los costos de los materiales equivalentes para distintas solicitaciones de tránsito.

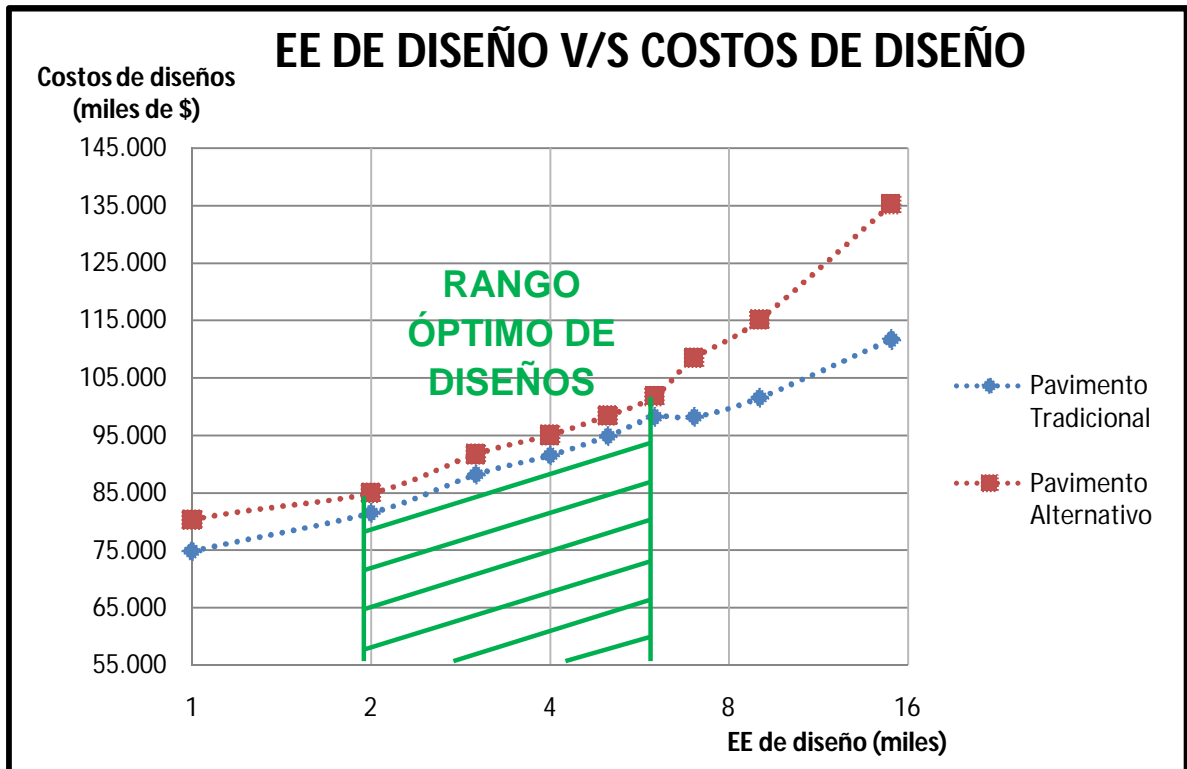


Figura 11.1 Costos de diseños equivalentes para diferentes EE

De las consideraciones de costos asumidas en este trabajo y restricciones constructivas, se puede observar en la Figura 11.1 que diseños para menos de 2 millones de EE y de más de 6 millones de EE, provocan un aumento en la diferencia de costos por m^3 de mezcla asfáltica para las soluciones planteadas con MDC y CAS. Es por esto, que el presente trabajo de título considera que un diseño para el rango de 2 a 6 millones de EE, será el más competitivo al momento de proponer al mandante una solución alternativa en MDC + binder que reemplace a la tradicional CAS + binder, aún cuando presente un sobrecosto aproximado de \$3.500.000 de pesos por kilómetro de camino (4% aproximadamente). Esto es factible si se considera la evidente mejora en las propiedades funcionales de esta nueva solución estructural.

12. CONCLUSIONES

- Los MDC presentan mayores exigencias en calidad de áridos que los CAS. Esta diferencia se centra en la fracción gruesa de su esqueleto mineral que corresponde a la fracción retenida en el tamiz 2,5 mm. En el caso de las partículas chancadas se requiere de un 100% para los MDC, mientras que para los CAS un 90% como mínimo. Otra condicionante es el máximo desgaste de los ángeles permitido, siendo un 20% para los MDC y un 25% para los CAS. La obtención de pétreos que cumplan con estas exigencias se puede ver condicionado a la capacidad de producción de las plantas de áridos.
- La textura superficial de un pavimento está determinada por la microtextura y macrotextura, es este último parámetro el que proporciona mejores propiedades funcionales en drenabilidad y emisión de ruido a los MDC respecto a los CAS, alcanzando niveles de arena que oscilan entre 1,2 mm y 2 mm.
- Los MDC son mezclas de granulometría discontinua porque carecen de tamaños intermedios y finos, contemplan un elevado contenido de árido grueso entre un 70% y un 80%, lo que asegura un buen rozamiento interno del esqueleto mineral, originando mezclas menos densas y con mayor porcentaje de vacíos, mientras que las mezclas tradicionales están constituidas por granulometría continua, es decir áridos de todos los tamaños.
- Los microaglomerados presentan un mayor *confort* y mejores condiciones de seguridad que las mezclas tradicionales, debido a su baja sonoridad y drenabilidad superficial producto de la regularidad de su textura, reduciendo el ruido de rodado en hasta 2 dB en pavimento seco y 5 dB en pavimento mojado, ventaja altamente valorada en zonas urbanas. Su drenabilidad superficial permite mejorar la visibilidad del camino y la percepción de las marcas viales en días de lluvia al disminuir el efecto *spray*, como también evitar la acumulación de una película de agua continua en su superficie disminuyendo el riesgo del efecto hidroplaneo.
- Los diseños comparados lograron tener similar capacidad estructural a los 2 millones de EE, ya que a este nivel de sollicitación el espesor del binder logra equiparar la deficiencia estructural del MDC respecto al CAS, el que se aumentó en forma constante hasta solucionar el mayor nivel de tránsito permitido correspondiente a 6 millones de EE, llegando al máximo y mínimo de iteraciones permitidas según el espesor mínimo de construcción de binder en una sola capa.
- El diseño propuesto tiene un costo económico mayor que uno tradicional en un 4%, lo que es un porcentaje razonable para ser considerado como alternativa de solución, para mejorar las propiedades funcionales que presentan las mezclas tradicionales, que en la vida útil proyectada corresponde a una sollicitación de hasta 6 millones de EE, de acuerdo a los criterios establecidos, condiciones de diseños evaluados y recomendaciones del Manual de Carreteras para el diseño de pavimentos flexibles nuevos. Este costo de inversión se puede equiparar o compensar con un menor costo de mantenimiento durante su vida útil, debido a su mayor durabilidad y resistencia a la fatiga, ambas ventajas son consecuencia de la utilización de asfaltos modificados con polímeros y por la mayor exigencia en la calidad de sus áridos.

- A pesar de que en Chile sólo se utilizan los MDC como carpetas de recapado, se recomienda el uso de este tipo de mezclas desde un diseño inicial, para entregar desde un comienzo mayores beneficios funcionales, que se traducen en una mejor calidad de vida para las personas al disminuir el impacto acústico y aumentar la seguridad vial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]Muñoz, G. (2010) Introducción a la tecnología de los microaglomerados asfálticos discontinuos en caliente, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad.
- [2]Ruiz, A. (2006). Panorámica española de las mezclas bituminosas en caliente. Intevía. España. 149, 27- 37.
- [3]Sánchez, P. (2009). Tendencias en asfalto. Revista Bit. Chile. N° 64, 70 – 75.
- [4]Saavedra, A. (2012). Desarrollos en pavimentos. Revista Bit. Chile. N° 86, 54 – 59.
- [5]Sámara, A. (2014). Nueva tecnología reduce costos y aumenta la seguridad. Revista El Teniente N°2270, (1): 21.
- [6]Niño, G. & Ramírez A. (2009). Mejoramiento de la adherencia llanta- camino empleando microaglomerados. [Tesis de Pregrado]. Ingeniería Civil Universidad Industria de Santander.
- [7] World Health Organization (WHO). (2009). Night noise guidelines for Europe. ISBN 978 92 890 4173 7. Consultado el 1 de Octubre de 2014 en: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0017/43316/E92845.pdf
- [8]Miró, R. (2006) Nuevas mezclas para capas de rodadura y su influencia en el *comfort* (ruido) y la seguridad. Universidad Politécnica de Cataluña.Zaragoza, 14Diciembre.
- [9]Duque, G. (2002) Para la ejecución y control de calidad de los parámetros asfálticos o flexibles. Consultado el 10 de Setiembre de 2014 en: <http://es.scribd.com/doc/24569151/Pavimentos-flexibles#scribd>
- [10]Ministerio de Obras Públicas (MOP), (2008) Manual de Carreteras, Volumen N°5. Especificaciones Generales de Construcción, Gobierno de Chile, Dirección de Vialidad.
- [11]Fernández, C. (2007). Formulación de un proyecto de seguimiento para carpeta de rodadura de microaglomerado discontinuo en caliente. [Tesis de Pregrado]. Ingeniería Civil Universidad de Chile.
- [12]Lorenzo, J. (2002). Estudio de la tenacidad de los microaglomerados reciclados en caliente mediante el ensayo BTD efecto del tipo y contenido de betún. [Tesis de Pregrado]. Ingeniería Civil Universidad Politécnica de Cataluña.
- [13]Jil, L. (2009).Estudio del comportamiento de los microaglomerados asfálticos discontinuos en caliente aplicados en Chile y revisión de su normativa actual.[Tesis de Pregrado]. Ingeniería Civil Universidad de Chile.
- [14]Delgadillo, R. (2011). Agrietamiento en mezclas asfálticas chilenas. Consultado el 10 de septiembre de 2014 en: <http://www.ociv.usm.cl/wp-content/uploads/PresentacionAgrietamientoMezclasD0911174.pdf>

- [15]Echeverría, D. (2011) Impacto acústico de autopistas. Análisis de cuatro casos en Chile [Tesis de Pregrado]. Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- [16]Ministerio de Obras Públicas (MOP), (2008) Manual de Carreteras, Volumen N°8. Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control, Gobierno de Chile, Dirección de Vialidad.
- [17]Winter, A. (2012). *Aquaplaning*. Consultado 22 de octubre de 2014 en: <http://www.oponeo.es/articulo/aquaplaning>
- [18]Crespo, R. (1999). Calidad ante la rodadura. Jornadas sobre la calidad en el proyecto y la construcción de carreteras, Barcelona, 19 Mayo, (paper).
- [19]Zúñiga, R. (2012). Microaglomerados en caliente en Chile. Seminario internacional recapados asfálticos de alto desempeño. Universidad Técnica Federico Santa María, 30 mayo - 1 Junio de 2012.
- [20]Pérez, F. (2012). Investigación punta de recapados en España microaglomerados y capas finas. Seminario internacional recapados asfálticos de alto desempeño. Universidad Técnica Federico Santa María, 30 mayo - 1 Junio de 2012.
- [21]Ministerio de Obras Públicas (MOP), (2008) Manual de Carreteras, Volumen N°3. Instrucciones y Criterios de Diseño Gobierno de Chile, Dirección de Vialidad.
- [22]AASHTO. (1993). Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [23]Ministerio de Obras Públicas (MOP), (2002) Programa PAVIVIAL 1.0. Gobierno de Chile, Dirección de Vialidad.

ANEXOS

ANEXO A



CONICYT
Ministerio de
Educación
Gobierno de Chile

FONDEF
Fondo de Fomento al Desarrollo
Científico y Tecnológico

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA
Departamento de Obras Civiles

Agrietamiento en Mezclas Asfálticas Chilenas

Rodrigo Delgadillo Sturla, PhD

CONSTRUCTORA
ASFALCURA

Autoclima
central.

abertis

ISA INTERVIAL

Agradecimientos

- ▶ UTFSM
 - ▶ Carlos Wahr
 - ▶ Gabriel García
 - ▶ Felipe Araya
 - ▶ Esteban Marín
 - ▶ Mauricio Toro
 - ▶ Ignacio Martínez
 - ▶ Álvaro González
- ▶ Asfaltos Chilenos

▶ 2

Mezclas Asfálticas Estudiadas

Mezcla Asfáltica	Granulometría	Ligante Asfáltico
IV-A-12 Trad	IV-A-12	CA 24 (Trad)
IV-A-12 Mod	IV-A-12	60-80 (Mod)
M-10	M-10	60-80 (Mod)
SMA Ale	SMA 11 S	60-80 (Mod)
SMA Pob	SMA 11 S	60-80 (Mod)

▶ 3

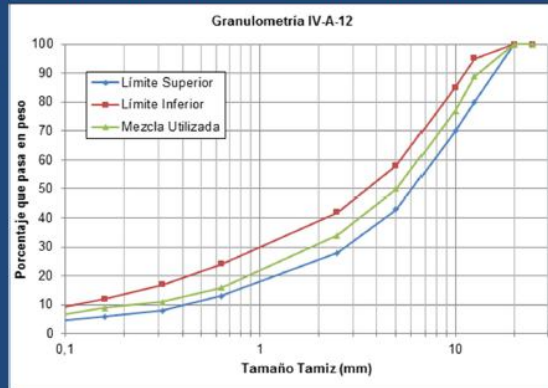
Ensayos de Caracterización y Desempeño

- ▶ Ligantes Asfálticos
 - ▶ Ensayos tradicionales completos
 - ▶ Ensayos Superpave
 - ▶ Ensayos post Superpave
- ▶ Mezclas Asfálticas
 - ▶ Módulo Dinámico
 - ▶ Ahuellamiento en Rueda de Hamburgo
 - ▶ Fatiga en Viga de Cuatro Puntos

▶ 4

Mezcla IV-A-12 C

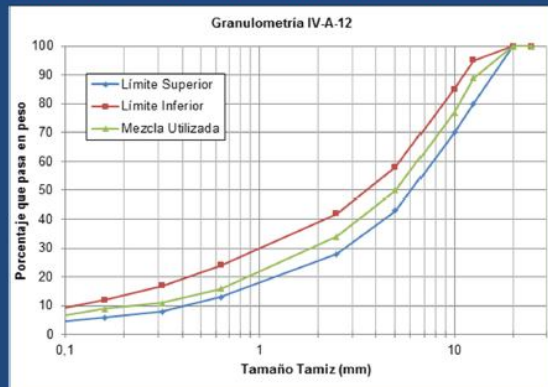
- ▶ Ligante Asfáltico
 - ▶ Tradicional CA-24
 - ▶ PG 64-22
- ▶ Diseño Marshall
 - ▶ 5,2% de Asfalto
 - ▶ 4,8% de Huecos



▶ 5

Mezclas IV-A-12 M

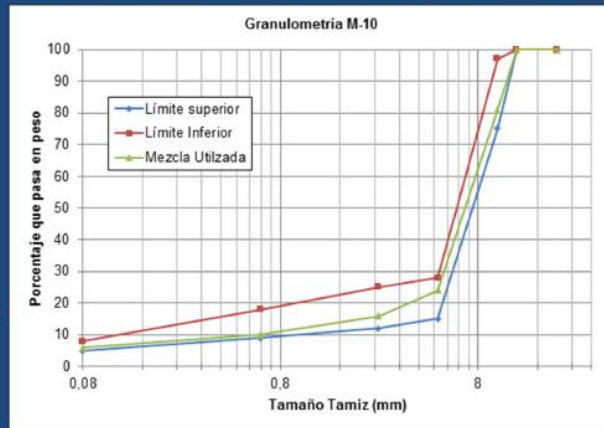
- ▶ Ligante Asfáltico
 - ▶ Modificado Pen 60-80
 - ▶ PG 70-22
- ▶ Diseño Marshall
 - ▶ 5,2% Asfalto
 - ▶ 5,0% de Huecos



▶ 6

Mezcla M-10

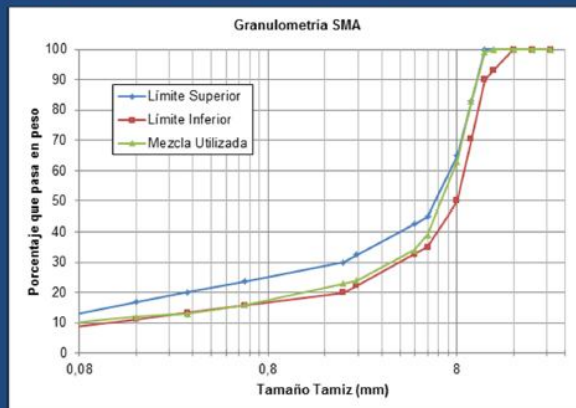
- ▶ Ligante Asfáltico
 - ▶ Pen 60-80
 - ▶ PG 70-22
- ▶ Diseño MC
 - ▶ 5,3% Asfalto
 - ▶ 10,4% huecos



▶ 7

Mezcla SMA Alemana

- ▶ Ligante Asfáltico
 - ▶ Pen 60-80
 - ▶ PG 70-22
- ▶ Diseño Marshall
 - ▶ 6,8% Asfalto
 - ▶ 2,9% Vacíos
 - ▶ Fibra Pellet

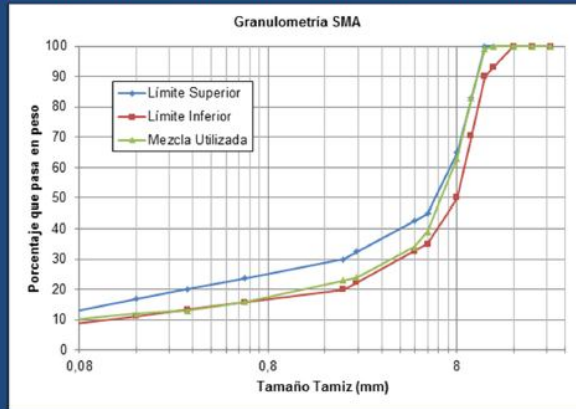


TL Asphalt - StB 07 (SMA 11 S)

▶ 8

Mezcla SMA Pobre

- ▶ Ligante Asfáltico
 - ▶ Pen 60-80
 - ▶ PG 70-22
- ▶ Diseño Marshall
 - ▶ 6,0% Asfalto
 - ▶ 4,9% Vacíos
 - ▶ Fibra Celulosa



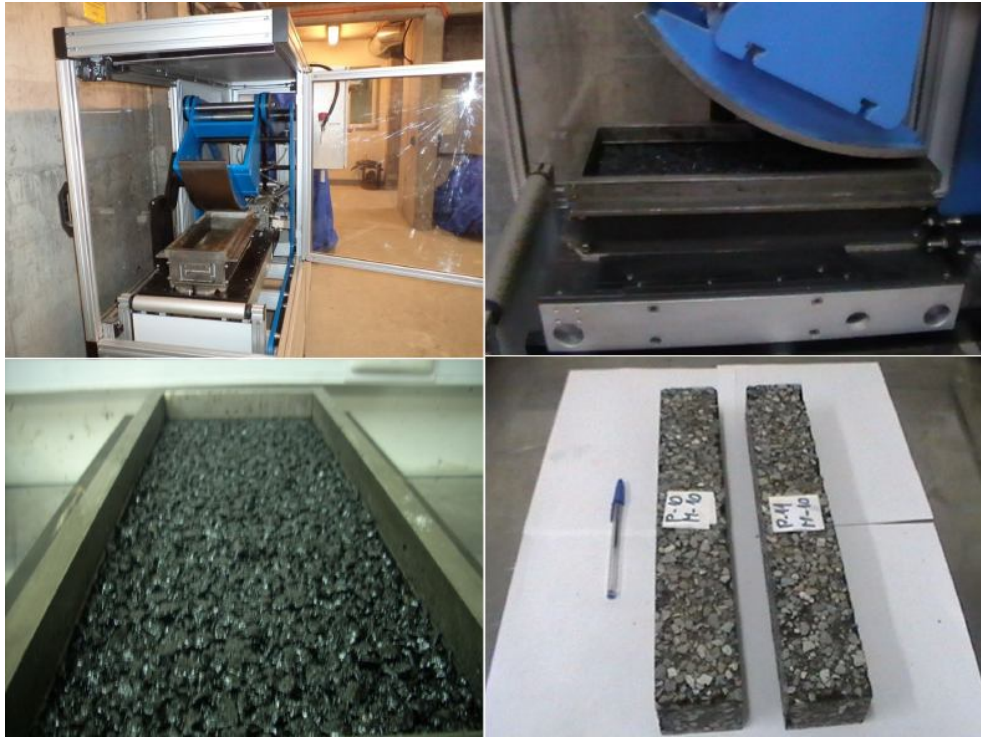
TL Asphalt - StB 07 (SMA 11 S)

▶ 9

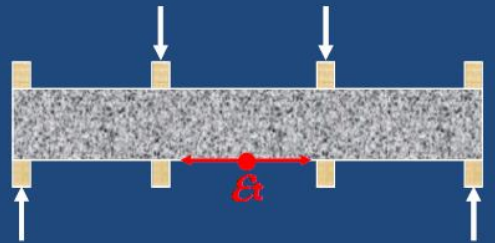
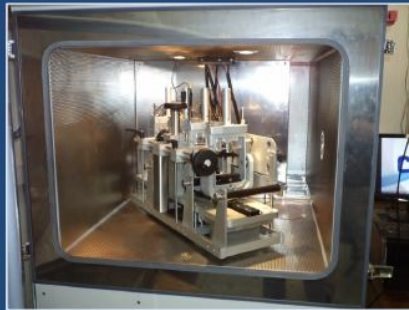
Fatiga



▶ 10



Ensayo de Fatiga con Viga Simplente Apoyada

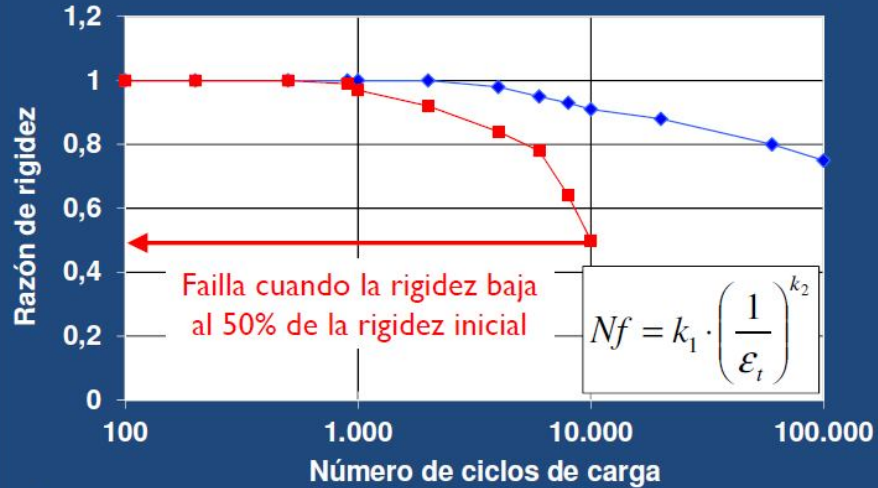


$380 \pm 6 \text{ mm (L)} \times 63 \pm 6 \text{ mm (An)} \times 50 \pm 6 \text{ mm (Al)}$

AASHTO TP8-94: Standard Test Method for Determination of the Fatigue Life of Compacted HMA Subjected to Repeated Flexural Bending

$$Nf = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{k_2}$$

Definición de falla (deformación constante)



▶ 13

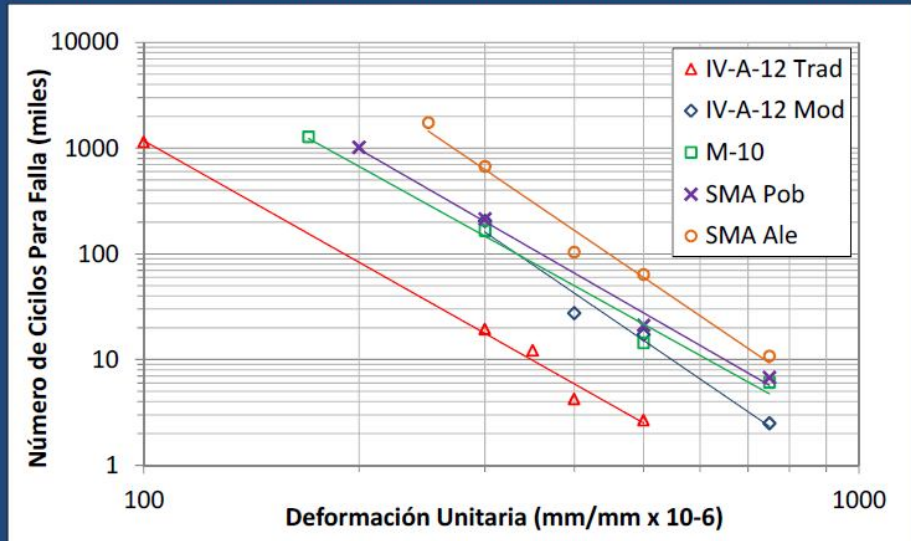
Mezcla IV-A-12 Asfalto Tradicional

▶ Resultados para cada probeta ensayada.

Probeta	Deformación ($\mu\epsilon$)	Alto (mm)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Nf_{50}	% de Vacíos
11	500	47,2	63,2	380,5	2400	4,61
17	500	50,5	62,8	378,5	2382	4,45
14	400	48,0	62,8	377,5	4178	5,03
18	400	50,0	63,0	378,5	4800	4,45
13	350	49,8	62,5	378,8	11272	5,03
19	350	51,0	64,2	374,5	12045	4,73
12	300	46,8	62,7	380,0	15664	4,61
20	300	51,0	64,0	374,6	18537	4,73
15	100	49,6	62,0	376,0	1333500	5,09
16	100	49,3	62,0	375,5	948500	5,09

▶ 14

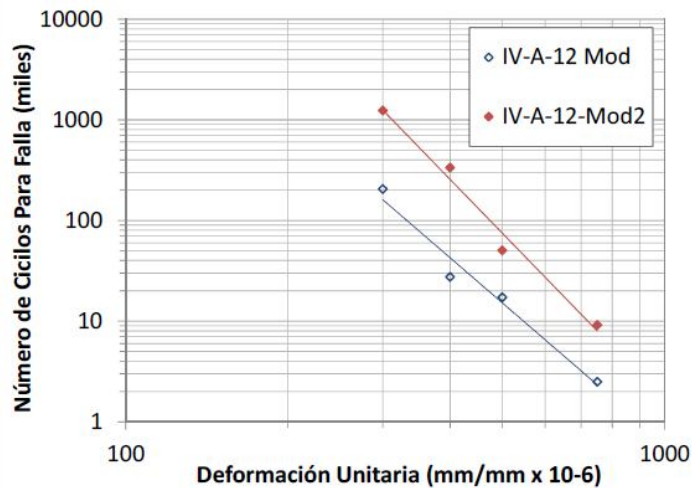
Resultados de Fatiga



▶ 15

¿Influencia del Asfalto Base?

Ligante	Exacta		MC 8.301.8		Temp Cumplimiento parámetro Fatiga
	PG XX	PG YY	PG XX	PG YY	
Mod 2	74	-29	70	-28	16
Mod	70	-23	70	-22	18



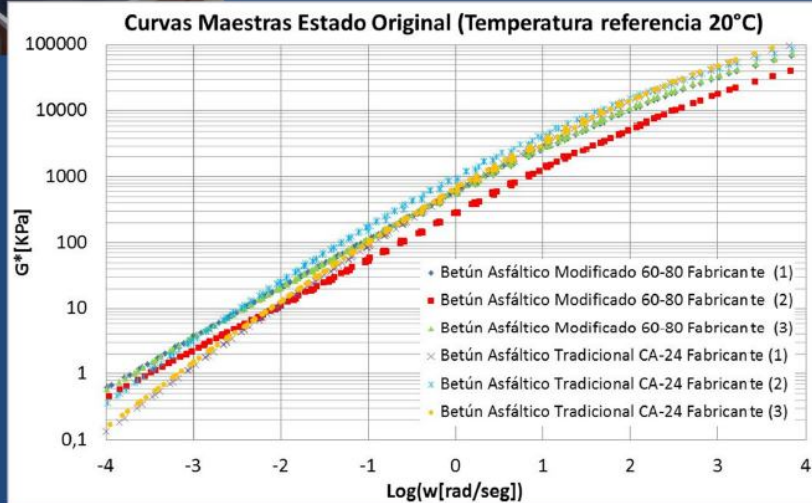
▶

Resultados de Fatiga

Mezcla Asfáltica	Ligante Asfáltico		N_{500}	ϵ_6 ($\mu\epsilon$)	Ranking
SMA Ale	Modif.	PG 70-22	63896	271	1^a
IV-A-12 Mod 2	Modif.	PG 70-28	50413	312	1^a
SMA Pob	Modif.	PG 70-22	21060	199	2 ^a
IV-A-12 Mod	Modif.	PG 70-22	15189	202	2 ^a
M-10	Modif.	PG 70-22	14404	180	2 ^a
IV-A-12 Trad	Tradic.	PG 64-22	2661	104	3 ^a

▶ 17

Curvas Maestras Ligantes Asfálticos



▶

Conclusiones

- ▶ Fuerte influencia del tipo de betún en la susceptibilidad al agrietamiento de las mezclas asfálticas
- ▶ Betunes modificados tienen un desempeño significativamente superior en la resistencia al agrietamiento
- ▶ La mezclas IV-A-12 con ligante tradicional mostró el desempeño más bajo a fatiga
- ▶ Las mezclas IV-A-12, M-10 y SMA Pobre con ligante modificado mostraron desempeños a fatiga muy similares
- ▶ La mezcla SMA Alemana mostró un desempeño a fatiga superior al resto de las mezclas

▶ 19

Conclusiones

- ▶ El betún base utilizado en la fabricación del ligante modificado, al parecer tiene una influencia significativa en el desempeño de la mezcla
- ▶ Ligante base (para modificar) óptimo para la región central:
 - ▶ PG58-28
 - ▶ AC-20 ASTM USA
 - ▶ NO CA-14
 - ▶ NO ASTM Latinoamericano

▶ 20

Ahuellamiento

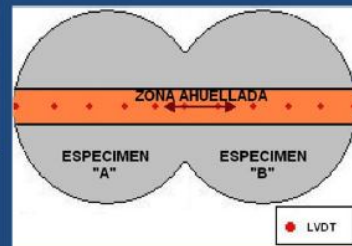
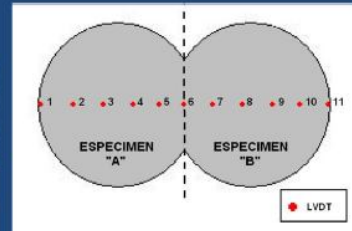


Ensayo Rueda de Hamburgo



Norma AASHTO T 324

Fabricación de Probetas



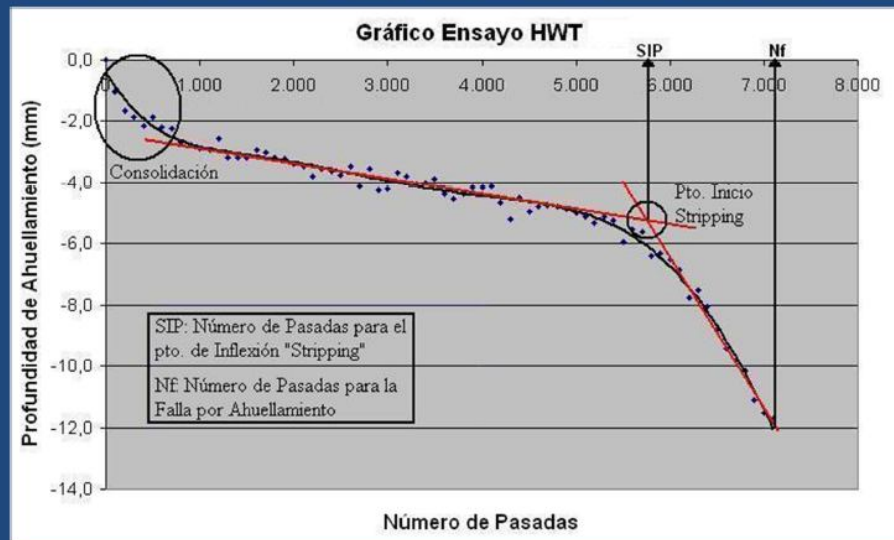
▶ 23

Características de las Probetas

Parámetros	Unidad	Valor
Altura	[mm]	62
Diámetro	[mm]	150
Numero de Probetas	#	3
Temperatura de Ensayo	[°C]	50
Medio de Prueba	-	Agua
Carga de Prueba	[N]	705
Velocidad de la Rueda	[m/s]	0,305
Tiempo Acondicionamiento	[min]	30
Ahuellamiento Maximo	[mm]	20
	[N°Pasadas]	10.000 Lig. Trad.
		20.000 Lig. Mod.

▶

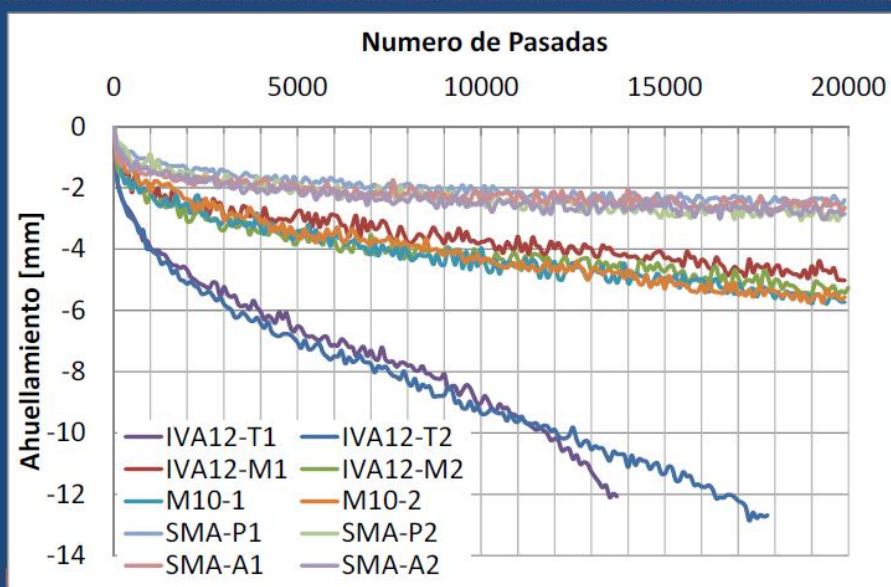
Caracterización del Ahuellamiento



Mezclas en Estudio

N°	Granulometría	Asfalto	Empresa	% Huecos
1	IV-A-12 Trad1	Trad CA-24	1	7,6
2	IV-A-12 Trad2	Trad CA-24	2	7,6
3	IV-A-12 Mod1	Mod 60/80	1	7,6
4	IV-A-12 Mod2	Mod 60/80	2	7,4
5	M10 Mod1	Mod 60/80	1	10,0
6	M10 Mod2	Mod 60/80	2	10,0
7	SMA Pob1	Mod 60/80	1	5,7
8	SMA Pob2	Mod 60/80	2	5,7
9	SMA Ale1	Mod 60/80	1	4,9
10	SMA Ale2	Mod 60/80	2	4,8

Resultados (promedio de tres probetas para cada mezcla)



Resultados

Mezclas	Pasadas					Strip. Point [pasadas]
	1000	5000	10000	15000	20000	
Profundida [mm]						
IV-A-12 T1	3,9	6,5	9,0	-	-	11503
IV-A-12 T2	4,0	7,0	9,4	11,3	-	16803
IV-A-12 M1	1,9	2,8	3,8	4,3	5,0	N/O
IV-A-12 M2	2,2	3,8	4,2	4,7	5,3	N/O
M10 M1	2,2	3,4	4,0	5,0	5,9	N/O
M10 M2	2,1	3,6	4,4	5,3	2,5	N/O
SMA Pob1	1,1	1,8	2,1	2,3	2,5	N/O
SMA Pob2	0,9	1,9	2,3	2,6	2,9	N/O
SMA Ale1	1,5	1,9	2,4	2,5	1,1	N/O
SMA Ale2	1,6	2,0	2,5	2,6	2,8	N/O

Conclusiones Ahuellamiento

- ▶ Se observa en las mezclas del tipo SMA un desempeño muy superior a los demás tipos de mezcla.
- ▶ No se observa diferencias significativas entre mezclas modificadas IV-A-12 y los Microaglomerados en caliente.
- ▶ Existe un gran aumento en la resistencia al ahuellamiento al usar mezclas fabricadas con betunes modificados con elastómeros

Conclusiones Ahuellamiento

- ▶ Las mezclas fabricadas con betunes modificados no presentan susceptibilidad a la humedad en el rango de estudio.
- ▶ Las mezclas fabricadas con betunes tradicionales presentan susceptibilidad a la humedad (pero clasifican como buenas mezclas según las recomendaciones Americanas).

Tareas Pendientes

- ▶ Seguimiento de Pistas de Prueba



▶ 31



FONDEF
Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA
Departamento de Obras Civiles

Agrietamiento en Mezclas Asfálticas Chilenas



32