



Facultad de Ingeniería

Escuela de Construcción Civil

**Análisis del comportamiento de mezclas asfálticas con
incorporación de zeolita natural chilena en reemplazo
parcial de árido fino**

Por

Jorge Alejandro Barrera Maturana

**Tesis para optar al
Grado de Licenciado en Ciencias de la Construcción y al Título
de Ingeniero Constructor**

Prof. Guía: Fernando Salas Riquelme

Diciembre, 2017

Dedicatoria

*Todas vuestras cosas sean hechas con amor. 1 Corintios 16:14.
En primer lugar, doy gracias a Dios Todopoderoso, quien me dio la vida y lo que más
amo de ella.*

*Dedico este trabajo a Jorge Barrera y Marisol Maturana, mis padres; a Bárbara,
Valentina y Nicolás, mis hermanos, y a Fernanda y Catalina, mis sobrinas; quienes
día a día, me brindan su amor y apoyo incondicional.*

Agradecimientos

A mi querida familia por su constante compañía e incondicional apoyo en todos los procesos académicos que me ha tocado enfrentar.

Al profesor Fernando Salas por su dirección como profesor guía y su oportuno consejo durante el desarrollo de esta investigación.

A Guillermo Brante, Jefe en la unidad de gestión de calidad y Laboratorio del Ministerio de Obras Públicas, y profesor de la Universidad de Valparaíso, por su apoyo y guía en los procesos de laboratorio.

Al equipo que conforma el Laboratorio regional de Vialidad (V Región) por su valioso apoyo en las etapas experimentales de esta investigación al facilitarme insumos para la fabricación de las mezclas asfálticas y brindarme acceso a sus instalaciones.

A Felipe Yáñez, laboratorista de la empresa Bitumix S.A., por su disposición y ayuda durante las jornadas de ensayos en las dependencias del laboratorio de la empresa.

A mi buen amigo Patricio Araya por su valiosa ayuda en las extensas jornadas de trabajos experimentales fabricando y ensayando mezclas asfálticas.

Al profesor Andrés Jamet, por orientarme en el desarrollo del presente estudio y por su disposición en las actividades realizadas en los laboratorios de la Universidad de Valparaíso.

A los profesores Uriel Padilla y Rodrigo Ortíz por guiarme en el proyecto de tesis y en los procesos ligados a la metodología de investigación.

A Nicolás Pino, Jefe de Oficina Técnica en Ingeco S.A., por darme las facilidades necesarias en el ámbito laboral mientras desarrollaba las actividades relacionadas con este estudio.

A la Escuela de Construcción Civil de la Universidad de Valparaíso por brindarme los conocimientos y competencias que me han permitido abordar la presente investigación de título.

Gracias a todos por confiar y creer que este proyecto se podía concretar y constituir un aporte al conocimiento y desarrollo de tecnologías ligadas a la Ingeniería en Construcción.

Índice general

Dedicatoria	2
Agradecimientos	3
Glosario	10
Lista de abreviaturas y siglas	13
Lista de símbolos	14
Lista de figuras	15
Lista de tablas	18
Resumen	19
Introducción	20
1. Antecedentes generales	22
1.1 Planteamiento del Problema	22
1.2 Objetivos	24
1.2.1 Objetivo general	24
1.2.2 Objetivos específicos	24
1.3 Variables de estudio	24
1.4 Alcances de la investigación	24
1.5 Metodología de investigación	25
1.5.1 Plan Experimental	27
1.5.2 Muestras	27
1.5.3 Instrumentos de investigación	27
1.5.3 Análisis de datos	27
2. Marco teórico, empírico y estado del arte	29
2.1 Antecedentes generales	29
2.2 Situación actual en Chile referente al uso y producción de mezclas asfálticas	30
2.3 Mezclas asfálticas en caliente (MAC)	33
2.3.1 Propiedades de las MAC	33
2.3.2 Métodos volumétricos de diseño	34
2.3.3 Método de diseño Marshall	35
2.3.3.1 Propiedades consideradas en el método de diseño Marshall	36
2.3.3.1 Contenido óptimo de asfalto	38
2.4 Mezclas asfálticas tibias (MAT)	39
2.4.1 Antecedentes Generales	39

2.4.1.1 Historia	40
2.4.2 Principio de funcionamiento	40
2.4.2.1 Procesos de espumación	41
2.4.3 Análisis de los productos comerciales que utilizan zeolita sintética	42
2.4.3.1 Procesos de espumación con zeolita sintética	42
2.4.4 La Zeolita	43
2.4.4.1 Definición, composición y estructura.....	43
2.4.4.2 Propiedades	44
2.4.4.3 Zeolitas en Chile.....	45
2.4.5 Especificaciones técnicas.....	45
2.4.5.1 Diseño de la mezcla	45
2.4.5.2 Ensayo de tracción indirecta (ITS)	48
2.4.6 Propiedades, rendimiento y costos comparativos	51
2.4.6.1 Rendimiento	51
2.4.6.2 Propiedades	51
2.4.6.3 Costos comparativos.....	54
2.4.7 Ventajas y desventajas de las MAT	55
2.4.7.1 Ventajas	55
2.4.7.2 Desventajas.....	57
2.4.7.3 Posibles campos de especialización de las MAT (posibles aplicaciones específicas)	59
2.4.8 Investigación nacional referente al uso de zeolita natural chilena en mezclas asfálticas tibias	59
2.4.8.1 Validación de la temperatura de mezclado.....	60
2.4.8.2 Validación del procedimiento de mezclado.....	60
2.4.8.3 Evaluación de asfalto-zeolita	61
2.4.8.4 Clasificación del asfalto.....	61
3. Diseño experimental	64
3.1 Etapas de la actividad experimental	64
3.1.1 Primera etapa	65
3.1.2 Segunda etapa	65
3.2 Variables de la investigación	67
3.2.1 Variables involucradas en etapa 1	67
3.2.2 Variables involucradas en etapa 2	67
3.2.3 Definición de variables	68
3.2.3.1 Definición variables de control	68
3.2.3.2 Definición variable independiente	69

3.2.3.3 Definición variables dependientes	69
3.2.4 Evaluación de variables.....	70
4. Desarrollo experimental	71
4.1 Materiales utilizados	71
4.1.1 Cemento asfáltico	71
4.1.2 Agregado mineral	71
4.1.3 Zeolita	72
4.2 Fabricación de mezclas asfálticas	73
4.2.1 Preparación de probetas	74
4.2.1.1 proceso de mezclado	74
4.2.1.2 Compactación de probetas	75
4.3 Densidades de probetas compactadas	76
4.4 Medición de estabilidad y fluencia	77
4.5 Ensaye de tracción indirecta (ITS).....	79
4.6 Ensayes preliminares.....	80
4.6.1 Contenido de humedad en la zeolita	80
4.6.2 Granulometría de los Áridos	82
4.7 Diseño de la mezcla patrón (MAC Patrón)	84
5. Presentación y análisis de resultados	87
5.1 Diseño y resultados de la mezcla en caliente con incorporación de 0,3% de zeolita (MAC 0,3%).....	87
5.2 Resultados de las mezclas tibias con zeolita natural chilena.....	95
5.2.1 Propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia.....	95
5.2.2 Ensayos de Tracción Indirecta (ITS)	102
5.3 Análisis, comentarios y discusión	106
5.3.1 Compactación.....	106
5.3.2 Curado	107
5.3.3 Sensibilidad a la humedad	107
5.3.4 Rigidez de la mezcla.....	108
5.3.5 Deformaciones permanentes	108
5.3.6 Contenido de asfalto.....	108
6. Conclusiones y recomendaciones	110
6.1 Conclusiones generales.....	110
6.2 Conclusiones específicas	111

6.2.1 Mezcla en caliente con incorporación de 0,3% de zeolita	111
6.2.2 Mezclas tibias con incorporación de zeolita	112
6.2.2.1 Propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia	112
6.2.2.1 Ensayos de Tracción Indirecta (ITS).....	113
6.3 Recomendaciones y futuras líneas de investigación.....	113
Referencias bibliográficas.....	115
Anexos.....	115
Anexos A.....	118
Anexo A1: Deshidratación en horno de muestras de zeolita tamaño 0,15 mm a diversas temperaturas.....	118
Anexo A2: Hidratación en ambiente de laboratorio de muestras deshidratadas de zeolita tamaño 0,15 mm.....	119
Anexos B.....	120
Anexo B1: Valores de densidad real de probetas compactadas (DRC) correspondientes al diseño de la mezcla patrón (MAC Patrón).....	121
Anexo B2: Valores de estabilidad y fluencia de la mezcla patrón (MAC Patrón)	122
Anexo B3: Valores de VAM, Va y V _{LL} de la mezcla patrón (MAC Patrón).....	123
Anexo B4: Valores de densidad real de probetas compactadas (DRC) correspondientes al diseño de la mezcla en caliente con incorporación de 0,3% de zeolita (MAC 0,3%)	124
Anexo B5: Valores de estabilidad y fluencia de la mezcla en caliente con incorporación de 0,3% de zeolita (MAC 0,3%)	125
Anexo B6: Valores de VAM, Va y V _{LL} de la mezcla en caliente con incorporación de 0,3% de zeolita (MAC 0,3%).....	126
Anexo B7: Valores de densidad real de probetas compactadas (DRC) de las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias) utilizadas en el ensaye de estabilidad y fluencia.....	127
Anexo B8: Valores de estabilidad y fluencia de las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias).....	128
Anexo B9: Valores de VAM, Va y V _{LL} de las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias).....	129
Anexo B10: Valores de resistencia a tracción indirecta (ITS) y porcentajes de resistencia a tracción retenida (TSR) de las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias).	130
Anexos C.....	131
Anexo C1: Estadísticos descriptivos de las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 4,0% de Asfalto	132
Anexo C2: Análisis de varianza entre las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 4,0% de Asfalto.....	133

Anexo C3: Estadísticos descriptivos de las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 4,5% de Asfalto	134
Anexo C4: Análisis de varianza entre las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 4,5% de Asfalto.....	135
Anexo C5: Estadísticos descriptivos de las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 5,0% de Asfalto	136
Anexo C6: Análisis de varianza entre las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 5,0% de Asfalto.....	137
Anexo C7: Estadísticos descriptivos de las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 5,5% de Asfalto	138
Anexo C8: Análisis de varianza entre las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 5,5% de Asfalto.....	139
Anexo C9: Estadísticos descriptivos de las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 6,0% de Asfalto	140
Anexo C10: Análisis de varianza entre las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 6,0% de Asfalto	141
Anexo C11: Estadísticos descriptivos de propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia en mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias).....	142
Anexo C12: Análisis de varianza entre las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias).....	144
Anexo C13: Comparaciones múltiples y subconjuntos homogéneos de las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias).....	145
Anexo C14: Estadísticos descriptivos de los valores de resistencia a tracción indirecta en estado seco y análisis de varianza, entre las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias).....	148
Anexo C15: Comparaciones múltiples y subconjuntos homogéneos de los valores de resistencia a tracción indirecta en estado seco, entre las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias).....	149
Anexo C16: Estadísticos descriptivos de los valores de resistencia a tracción indirecta en estado saturado y análisis de varianza, entre las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias).....	150
Anexo C17: Comparaciones múltiples y subconjuntos homogéneos de los valores de resistencia a tracción indirecta en estado saturado, entre las mezclas fabricadas a 135° C (Mezclas tibias).....	151
Apéndices	152
Apéndice 1: Numeral 8.302.38 del Manual de Carreteras, volumen 8. <i>“Método para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas”</i>	152

Apéndice 2: Numeral 8.302.47 del Manual de Carreteras, volumen 8. “ <i>Método de diseño Marshall</i> ”.....	156
Apéndice 3: Numeral 8.302.40 del Manual de Carreteras, volumen 8. “Método para determinar la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas utilizando el aparato Marshall”.....	162
Apéndice 4: Numeral 5.413.205(2) del Manual de Carreteras, volumen 5, “Ensayo de tracción indirecta (ITS)”.....	171

Glosario

Ahuellamiento: Depresión longitudinal del pavimento que coincide con la zona donde pasan con mayor frecuencia las ruedas de los vehículos (huella). Surcos que pueden desarrollarse sobre un pavimento en los carriles de las ruedas. Los ahuellamientos pueden ser el resultado de una consolidación o movimiento lateral de una o más capas del pavimento bajo efectos del tráfico, o pueden ser generados por un desplazamiento de la superficie misma del pavimento. Pueden ocurrir bajo efectos del tráfico en pavimentos asfálticos nuevos que han tenido muy poca compactación durante su construcción, o como resultado del movimiento plástico de una mezcla que tiene muy poca estabilidad para resistir el tráfico

Árido Combinado: Árido resultante de la combinación de árido fino y árido grueso en proporciones definidas por el estudio de dosificación según las necesidades de un determinado proyecto.

Árido Fino: Árido que pasa por el tamiz de abertura nominal 5 mm (hormigón) y 2,5 mm (asfalto) y es retenido en el de 0,08 mm.

Árido Grueso: Árido retenido en el tamiz de abertura nominal 5 mm cuando se emplea en hormigón y 2,5 mm cuando se utiliza en asfalto.

Asfáltenos: Componentes de los asfaltos, solubles en tricloroetileno, pero insolubles en ciertos hidrocarburos parafínicos livianos. Le confieren la propiedad de dureza a los asfaltos.

Asfalto Modificado: Material que se obtiene al modificar un cemento asfáltico con un polímero, resultando un ligante de características reológicas mejoradas.

Capa de Rodadura: Capa superficial de un camino que recibe directamente la acción del tránsito. Debe ser resistente al deslizamiento, a la abrasión y a la desintegración por efectos ambientales.

Capa Asfáltica: Capa compuesta de una mezcla de agregados pétreos ligados con asfalto y apoyada sobre capas de sustentación.

Cemento Asfáltico: Material obtenido por refinación de residuos de petróleo y que debe satisfacer los requerimientos normativos establecidos para su uso en la construcción de pavimentos.

Filler: Polvo mineral fino que podrá ser cemento hidráulico, cal u otro material inerte, libre de materia orgánica y partículas de arcilla. Debe cumplir la siguiente granulometría: Para tamices de 0,630, 0,315 y 0,080 el porcentaje que pasa en peso es de 100, 95 a 100 y 70 a 100 % respectivamente.

Fisura (asfalto): Quiebre o rotura que afecta a las capas estructurales del pavimento, de variados orígenes, y cuyo ancho superficial es igual o menor que 3 mm.

Fluidez o Fluencia (mezcla asfáltica): Deformación correspondiente a la carga máxima de rotura de una probeta en el ensaye Marshall.

Grieta (asfalto): Quiebre o rotura que afecta a las capas estructurales del pavimento, de variados orígenes, y cuyo ancho superficial es mayor que 3 mm.

Lechada Asfáltica: Mezcla de emulsión asfáltica de quiebre lento, áridos finos, *filler* y agua en la cantidad necesaria para obtener una consistencia de pasta.

Ligante Asfáltico: Cemento basado en asfalto producido a partir de residuos de petróleo, ya sea con o sin adición de modificadores orgánicos no particulados. En esta tesis se usa el término “ligante” o “ligante asfáltico” indistintamente.

Maltenos: Componentes de los asfaltos, solubles en sulfuro de carbono, tetracloruro de carbono e hidrocarburos parafínicos livianos, que le confieren la propiedad de cohesividad o ligazón a los asfaltos.

Mezcla en Caliente: Mezcla asfáltica fabricada, extendida y compactada en un rango de temperatura que va desde los 140 °C a 170°C.

Microtextura (pavimentos): Textura microscópica o sub-visible, correspondiente a longitud de onda menor que 0,5mm y amplitud A entre 1 μm y 500 μm . Es función de las características de la superficie de las partículas de árido que sobresalen del pavimento.

Pavimento Flexible: Pavimento formado por una o varias capas asfálticas y/o materiales seleccionados o tratados, de módulos elásticos decrecientes con la profundidad. Normalmente, la capa de rodadura corresponde a una mezcla asfáltica o a una capa asfáltica de protección y las capas profundas, a materiales granulares del tipo base y subbase. En este caso, las cargas de tránsito vehicular son resistentes principalmente por la capacidad del sistema de absorber deformaciones, que le es conferida por las características de sus capas constitutivas y del suelo de fundación.

Polímero: Sustancia de alto peso molecular, formada por la unión de moléculas pequeñas llamadas monómeros, formando macromoléculas de diversas formas: cadenas en escalera, cadenas termofijas (que no son afectadas por cambios de temperaturas), cadenas largas y moléculas sueltas, etc.

Punto de Ablandamiento: Es la menor temperatura, a la que una muestra suspendida en un anillo horizontal de dimensiones especificadas y colocada dentro de un baño de agua o glicerina, es forzada a fluir 25 mm por el peso de una bola de acero especificada, debido a incrementos de la temperatura, a una velocidad prescrita.

Punto de Fragilidad Fraass: Temperatura a la que una película de material bituminoso muestra la primera fisura o rotura en su superficie, debido a la consistencia adquirida tras ser sometida, en condiciones especificadas, a ciclos sucesivos de flexión a temperaturas decrecientes.

Punto de Inflamación: Menor temperatura de calentamiento de un hidrocarburo, a la que la aplicación de una llama sobre la muestra de ensayo, provoca un destello de los vapores en la superficie del líquido.

Secado hasta Masa Constante: Límite de secado en que dos pesadas sucesivas, separadas por 1 hora de secado al horno, difieren en un porcentaje igual o inferior a 0,1% de la menor masa determinada.

Sostenible: La palabra “sustentable” se refiere a algo que puede sostenerse o sustentarse por sí mismo y con razones propias. Por su parte al hablar de “sostenible” nos referimos a algo que puede mantenerse por sí mismo gracias a que las condiciones económicas, sociales o ambientales lo permiten, y se puede sostener sin afectar los recursos. Aplicados al campo de la economía, la ecología o el desarrollo y responsabilidad social, el desarrollo sostenible y el desarrollo sustentable son sinónimos, y ambos términos pueden emplearse de forma indiferente. En esta tesis se utilizan ambos términos como sinónimos para referirse a un proceso que puede mantenerse sin afectar a la generación actual o futura, intentando que el mismo sea perdurable en el tiempo sin mermar los recursos actuales.

Sustentable: Ver “Sostenible”.

Stripping: Uno de los principales daños de mezclas asfálticas que ocurre cuando se separa el ligante asfáltico del agregado pétreo debido a la presencia de agua. A pesar del alto número de investigaciones realizadas, este fenómeno y las causas que lo generan no han sido totalmente entendidas e identificadas.

Trabajabilidad: La trabajabilidad de una mezcla asfáltica se asocia con su facilidad de mezclado, extendido y compactación. En laboratorio es posible valorar la primera y la última de estas operaciones: el mezclado manual es evaluable sólo cualitativamente, pero con equipamiento mecánico puede medirse el torque necesario para mantener una velocidad giratoria de paletas dentro de una mezcla suelta a una temperatura dada; en tanto que la compactabilidad es cuantificable con ensayos específicos que relacionan energía de compactación y densificación.

Vacíos en el Agregado Mineral: Es el volumen de vacíos entre las partículas de agregado de una mezcla compactada; incluye los huecos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como porcentaje del volumen total.

Viscosidad Cinemática: Se define como la relación entre el coeficiente de viscosidad (M) de un determinado viscosímetro, dividido por la densidad del líquido (ρ) que se analiza. La unidad de viscosidad cinemática en el sistema CGS es cm^2/s , llamada Stoke (St); la unidad SI de viscosidad cinemática es m^2/s y es equivalente a 104 St. Comúnmente, se usa el centistoke ($1 \text{ cSt} = 10^{-2} \text{ St}$).

Viscosidad: Se denomina coeficiente de viscosidad a la razón entre el esfuerzo de corte aplicado y la tasa de corte; es una medida de la resistencia del líquido a fluir y, comúnmente, se denomina viscosidad. En el Sistema Internacional, la unidad de viscosidad es el pascal segundo (Pa s); en el sistema CGS, la unidad de viscosidad es el poise (dinas/cm^2) y equivale a 0,1 Pa s. Frecuentemente, se usa como unidad de viscosidad el centipoise, que equivale a un milipascal segundo (1 m Pa s).

Lista de abreviaturas y siglas

- DRC** : Densidad real compactada
- EEUU** : Estado Unidos de Norteamérica
- HMA** : Mezcla asfáltica en caliente (Hot Mix Asphalt)
- HPDR** : Horno de película delgada rotatoria
- ITS** : Resistencia a Tracción Indirecta
- MAC** : Mezcla asfáltica en caliente
- MAF** : Mezcla asfáltica en frío
- MAT** : Mezcla asfáltica tibia
- MC** : Manual de Carreteras
- MOP** : Ministerio de Obras Públicas
- NCAT** : Centro Nacional de Tecnologías de Asfalto (EE.UU.)
- PAV** : Cámara de presión y vacío
- RAP** : Pavimento de asfalto reciclado
- RAS** : Tejas recicladas de asfalto
- TSR** : Resistencia a Tracción Retenida
- UE** : Unión Europea
- Va** : Huecos de aire
- VAM** : Vacíos en el agregado mineral
- VLL** : Vacíos llenos de asfalto
- WMA** : Mezcla asfáltica tibia (Warm Mix Asphalt)

Lista de símbolos

BTU	: Unidad Térmica Británica (British Thermal Unit)
°C	: grado Celsius
cc	: centímetro cúbico
cm	: centímetro
CP	: centipoise
cSt	: centistoke
D	: dina
ρ	: densidad
g	: gramo
h	: hora
kg	: kilogramo
kN	: kiloNewton
kPa	: kiloPascal
l	: litro
μm	: micrómetro
m	: metro
mg	: milígramo
min	: minuto
mm	: milímetro
N	: Newton
P	: poise
Pa	: pascal
s	:segundo
St	: stoke

Lista de figuras

Figura 1.1 – Esquema general de la metodología de investigación aplicada.....	26
Figura 2.1 – Clasificación de las mezclas asfálticas según temperatura de producción.....	30
Figura 2.2 – Estructura tipo de un pavimento flexible. Dimensiones en centímetros.....	30
Figura 2.3 – (Izq.) Compactador automático de impacto (martillo Marshall) con base estacionaria para moldes de 4". (Centro) Máquina Marshall de aplicación de carga con indicador análogo de estabilidad y fluencia. (Der.) Cabezal de ruptura o mordaza Marshall.	36
Figura 2.4 - Esquema de las distintas tecnologías de mezclas asfálticas tibias.....	41
Figura 2.5 – Esquema del estado de tensiones de un pavimento asfáltico bajo una carga simple.	48
Figura 2.6 – Configuración del ensayo y respuesta de la probeta.....	49
Figura 3.1 – Esquema general de las etapas de la actividad experimental.....	64
Figura 4.1 – Vistas de la zeolita utilizada.....	73
Figura 4.2 – (Izq.) Separación de áridos según tamaño, luego de tamizado, para reconstitución granulométrica. (Der.) Pesaje de las fracciones de árido para formar muestras de 1100 g. de árido en granulometría semidensa e incorporación de zeolita.	74
Figura 4.3 – (Izq.) contenedores de aluminio para calentado en horno de muestras de 1100 g. de árido. (Centro) Vista del interior del bol de mezclado en donde se aprecian los materiales constituyentes previo al proceso de mezclado. (Der.) Mezcla asfáltica sin compactar.....	74
Figura 4.4 – (Izq.) Compactador automático de impacto (martillo Marshall) con base estacionaria para moldes de 4". (Der.) Detalle del conjunto collar, molde y base. También se aprecia dentro del molde la base donde impacta el martillo y compacta la mezcla.....	75
Figura 4.5 – (Izq.) Muestra de mezcla asfáltica dentro del molde de compactación. (Centro) Algunas probetas compactadas en proceso de enfriamiento. (Der.) Herramienta hidráulica para extracción de probetas de moldes.....	76
Figura 4.6 – (Izq.) Pesaje de probeta en seco. (Centro) Pesaje de probeta sumergida en agua. (Der.) Pesaje de probeta en estado saturado superficialmente seco.....	76
Figura 4.7 – Equipo utilizado para el ensaye Marshall. Se observa a la izquierda el Baño de agua y a la derecha la máquina Marshall de aplicación de carga con indicador análogo de estabilidad y fluencia.....	77
Figura 4.8 – (Izq.) Mordaza desmontada para su lubricación y disposición de la probeta de ensaye (Der.) Probeta de mezcla asfáltica montada en el cabezal de ruptura Marshall.	78
Figura 4.9 – Medición de estabilidad y fluencia a una probeta mediante la máquina Marshall.....	78

Figura 4.10 – (Izq.) Horno de aire forzado utilizado para curar las probetas. (Der.) Vista interior del Horno de aire forzado.....	79
Figura 4.11 – Vista lateral, superior y frontal del cabezal de ruptura utilizado en el ensaye de tracción indirecta. Se observa la disposición de la probeta para recibir carga en un plano axial.	80
Figura 4.12 – (Izq.) Horno utilizado para deshidratación de muestras. (Der.) Pesaje en balanza de precisión de las muestras de zeolita.	80
Figura 4.13 – Pérdida de peso de la zeolita tamaño 0,15 mm en el tiempo a temperatura constante.	81
Figura 4.14 – Adsorción de humedad de la zeolita tamaño 0,15 mm en el tiempo.	82
Figura 4.15 – Curva de distribución granulométrica de los áridos combinados.	83
Figura 4.16 – Valores de la densidad para los diversos porcentajes de asfalto evaluados en el diseño Marshall de la mezcla patrón (MAC Patrón).	84
Figura 4.17 – Valores de Estabilidad para los diversos porcentajes de asfalto evaluados en el diseño Marshall de la mezcla patrón (MAC Patrón).	85
Figura 4.18 – Porcentajes de huecos de aire para los diversos porcentajes de asfalto evaluados en el diseño Marshall de la mezcla patrón (MAC Patrón).....	85
Figura 4.19 – Valores de fluencia para los diversos porcentajes de asfalto evaluados en el diseño Marshall de la mezcla patrón (MAC Patrón).	86
Figura 4.20 – Porcentajes de vacíos en el agregado mineral para los diversos porcentajes de asfalto evaluados en el diseño Marshall de la mezcla patrón (MAC Patrón).	86
Figura 4.21 – Porcentajes de huecos llenos de asfalto para los diversos porcentajes de asfalto evaluados en el diseño Marshall de la mezcla patrón (MAC Patrón).	86
Figura 5.1 – Densidades MAC Patrón y MAC 0,3%.....	88
Figura 5.2 – Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral MAC Patrón y MAC 0,3%.	89
Figura 5.3 – Porcentaje de Huecos de Aire en la Mezcla MAC Patrón y MAC 0,3%.	90
Figura 5.4 – Porcentaje de Huecos Llenos de Asfalto MAC Patrón y MAC 0,3%.	91
Figura 5.5 – Estabilidades MAC Patrón y MAC 0,3%.	92
Figura 5.6 – Fluencia MAC Patrón y MAC 0,3%.	93
Figura 5.7 – Densidad real compactada de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.....	96
Figura 5.8 – Porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.	97
Figura 5.9 – Porcentaje de huecos de aire en la mezcla de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.	98
Figura 5.10 – Porcentaje de huecos llenos de asfalto de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.	99

Figura 5.11 – Estabilidad de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.	100
Figura 5.12 – Fluencia de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.	101
Figura 5.13 – Valores de Tracción Indirecta en condición seca de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.....	103
Figura 5.14 – Valores de Tracción Indirecta en condición saturada superficialmente seca (sss) de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.	104
Figura 5.15 – Valores de Tracción Indirecta en condición saturada superficialmente seca (sss) de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.	105

Lista de tablas

Tabla 3.1 – Resumen de las mezclas asfálticas fabricadas y temperaturas de producción en la etapa 1.....	65
Tabla 3.2 – Ensayes realizados a las mezclas asfálticas en la etapa 1.....	65
Tabla 3.3 – Resumen de las mezclas asfálticas fabricadas y temperaturas de producción en la etapa 2.....	66
Tabla 3.4 – Ensayes realizados a las mezclas asfálticas en la etapa 2.....	66
Tabla 4.1 – Características del cemento asfáltico.....	71
Tabla 4.2 – Granulometría semidensa de áridos.....	72
Tabla 4.3 – Constantes físicas e hídricas del agregado mineral.....	72
Tabla 4.4 – Características físico-químicas de la zeolita utilizada.....	73
Tabla 4.5 – Áridos utilizados y sus granulometrías.....	82
Tabla 4.6 – Áridos utilizados y sus granulometrías.....	83
Tabla 4.7 – Granulometría de los áridos mezclados.....	83
Tabla 4.8 – Propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia del la mezcla MAC Patrón.....	84
Tabla 5.1 – Propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia del la mezcla MAC 0,3%.....	87
Tabla 5.2 – Requisitos para mezclas asfálticas en caliente.....	88
Tabla 5.3 – Comparación MAC Patrón y MAC 0,3%.....	94
Tabla 5.4 – Temperaturas de trabajo e Incorporación de zeolita en las mezclas.....	95
Tabla 5.5 – Propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.....	95
Tabla 5.6 – Valores de resistencia a tracción indirecta y porcentajes de resistencia a tracción retenida de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.....	102
Tabla 5.7 – Porcentajes de resistencia a tracción retenida (TSR) de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.....	105

Resumen

Durante los últimos años la industria asfáltica ha experimentado un continuo desarrollo tecnológico que ha permitido responder a distintas exigencias tanto constructivas como de rendimiento, sustentabilidad y protección medioambiental. Algunos de estos avances se relacionan con la utilización de una estructura mineral de gran angularidad y la incorporación de diferentes aditivos tales como polímeros y fibras, procesos que en muchos casos afectan la trabajabilidad de las mezclas producidas a temperaturas convencionales. Por ello, con el fin de obtener una trabajabilidad adecuada, se opta, generalmente, por aumentar la temperatura o tiempo de producción de las mezclas asfálticas, lo que conlleva a un mayor envejecimiento del asfalto y un mayor consumo de combustible en la etapa de producción.

Otras tecnologías guardan relación con la posibilidad de reducir las temperaturas de mezclado y compactación. Entre ellas se han estudiado recientemente la incorporación de zeolitas sintéticas y naturales para producir las llamadas mezclas asfálticas tibias que ofrecen diferentes ventajas ambientales, económicas y de ingeniería.

Sin embargo, el uso de las mezclas con incorporación de zeolitas se encuentra en etapa preliminar aún en aquellos países que han realizado investigaciones de laboratorio y tramos de prueba.

Estudios recientes indicaron que también es factible el uso de zeolita natural chilena de clasificación clinoptilolita en la producción de mezclas asfálticas. Por lo anterior es que surge la necesidad de estudiar la influencia que puede tener la incorporación de zeolita natural chilena en los parámetros volumétricos y mecánicos generalmente considerados para el diseño de mezclas y capas asfálticas, pues a la fecha no existen estudios enfocados a ello.

La presente investigación se trazó como objetivo principal evaluar experimentalmente las propiedades volumétricas y mecánicas, consideradas por el método de diseño Marshall, y la resistencia a tracción indirecta de mezclas asfálticas con incorporación de zeolita natural chilena y su efecto en la obtención del porcentaje óptimo de asfalto. La zeolita utilizada fue una de tipo clinoptilolita-mordenita incorporada a las mezclas en reemplazo parcial del árido fino. La granulometría utilizada corresponde a una graduación semidensa y el cemento asfáltico empleado fue un CA-24.

En primer lugar se diseñó, mediante el método Marshall, una mezcla asfáltica en caliente con incorporación de 0,3% de zeolita. Los resultados indicaron que para todos los contenidos asfálticos evaluados, la incorporación de zeolita produjo mayor densidad, estabilidad y fluencia que la mezcla patrón, mientras que el contenido de huecos de aire disminuyó. Adicionalmente se estableció la factibilidad técnica de producir mezclas con una reducción en el contenido óptimo de asfalto producto de la incorporación de zeolita.

En segundo lugar se fabricaron una serie de mezclas tibias con incorporación de zeolita en porcentajes crecientes. Los resultados obtenidos en esta etapa nuevamente arrojaron un aumento de la densidad, estabilidad y fluencia, y disminución de los huecos de aire, con respecto a la mezcla patrón, aunque en un grado menor a lo observado en la mezcla en caliente con incorporación de zeolita. Por su parte los resultados relativos a tracción indirecta mostraron que las mezclas tibias analizadas en este estudio, presentaron menor resistencia en estado seco y saturado, pero un porcentaje a tracción retenida mayor o igual a la mezcla patrón en la mayoría de los casos. Finalmente se estableció que la incorporación de zeolita a la mezcla asfáltica permite reducir las temperaturas de mezclado y compactación, manteniendo las propiedades volumétricas y mecánicas analizadas en rangos aceptables por la normativa chilena.

Palabras claves: zeolita natural chilena, clinoptilolita, mezcla asfáltica caliente, mezcla asfáltica tibia, método Marshall.

Introducción

La industria de las mezclas asfálticas se ha esmerado en encontrar mejoras tecnológicas que, en cierta manera, mejoren el rendimiento de los materiales, aumenten la eficiencia constructiva, conserven y respeten los recursos a utilizar y la hagan estar a la vanguardia del avance medioambiental [1]. La producción y extendido de las mezclas asfálticas ha evolucionado durante los últimos 130 años, pasando de la mezcla y extensión a mano con palas, a las plantas de alimentación informatizadas, con equipos de compactación, mezclas y extendido altamente automatizados. Durante este periodo, ha sido ampliamente aceptado el hecho de que el control de la temperatura es crucial para el adecuado recubrimiento del árido, la estabilidad de la mezcla durante la producción y el transporte, facilidad de extendido, y en última instancia para el adecuado rendimiento del asfalto.

Durante el extendido de las mezclas, la temperatura debe ser lo suficientemente alta como para asegurar la trabajabilidad de las mezclas, pero al mismo tiempo debe de estar por debajo del límite que provoque excesivo envejecimiento del asfalto [2]. Resulta por lo tanto lógico que uno de los caminos de investigación que se han llevado a cabo con objeto de conseguir las metas anteriormente mencionadas trate sobre la reducción de las temperaturas de producción de los materiales, una de las tareas en la producción de asfaltos donde el consumo energético y el daño ambiental son mayores [3,4]. Durante los últimos 20 años, se ha introducido, como resultado de estas investigaciones, el concepto de mezclas tibias de asfalto (MAT), en inglés denominadas Warm Mix Asphalt (WMA). Se entiende por mezclas tibias aquellas que se producen a temperaturas menores que las calientes convencionales, en un rango que va desde los 100 °C a los 140 °C.

Existe una amplia gama de procesos y aditivos que permiten mejorar las propiedades de las mezclas en caliente y también elaborar mezclas tibias, dentro de los cuales se han estudiado recientemente e implementado la incorporación de zeolitas sintéticas y naturales. No obstante, el estudio del comportamiento de mezclas asfálticas con adición de zeolita natural chilena se encuentra en una etapa muy preliminar, manteniéndose así muchas interrogantes frente al desempeño que pudiesen tener este tipo de mezclas.

En el presente texto se dan a conocer los detalles de la investigación realizada con el fin de evaluar experimentalmente el comportamiento de mezclas asfálticas con incorporación de zeolita natural chilena de clasificación clinoptilolita-mordenita. Según lo anterior, se diseñó una metodología de tipo experimental que contempló la realización de una serie de ensayos de laboratorio a mezclas asfálticas compactadas, con el fin de estimar en ellas propiedades que permitieron caracterizarlas y determinar posibles comportamientos. En este contexto, se estudian propiedades volumétricas de las mezclas fabricadas tales como densidad y vacíos, y otras propiedades mecánicas como estabilidad, deformación y resistencia a tracción indirecta.

El enfoque de análisis de los datos generados por la aplicación de ensayos, es principalmente de tipo cuantitativo. Sin embargo, con el fin de enriquecer el análisis de los resultados, se ha incorporado también un análisis de carácter cualitativo en relación a las características que representan las magnitudes medidas y que determinan ciertos comportamientos en las mezclas asfálticas analizadas.

A continuación se presenta una breve descripción de los capítulos que integran esta tesis.

Primeramente, en el capítulo 1, se presentan los antecedentes generales de la investigación, que incluyen el planteamiento del problema de estudio, los objetivos, los alcances de la investigación y la metodología utilizada.

En el capítulo 2, se muestra el marco teórico, el que incluye el estado del arte, antecedentes documentales y marcos referenciales en donde se sustenta y enmarca la presente investigación.

De acuerdo a la metodología implementada, en el capítulo 3 se dan a conocer los antecedentes que permiten describir cómo se estructura la actividad experimental; se precisan sus etapas y lo realizado en ellas, se definen las variables involucradas y como se evaluaron.

En el capítulo 4 se da a conocer la fase operativa de la investigación, que implica todo el trabajo realizado en laboratorio para determinar y evaluar las variables descritas en el capítulo anterior. En este contexto, se detallan las características de los materiales utilizados, los

procedimientos normados para la fabricación de mezclas asfálticas y probetas, y los ensayos utilizados. Además se presentan los resultados de trabajos experimentales preliminares referidos a la caracterización de materiales y diseño de la mezcla patrón, respectivamente.

En el capítulo 5, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos y procedimientos realizados en las dos etapas de la actividad experimental, referentes a la incorporación de zeolita natural chilena a mezclas asfálticas. Conjuntamente con la presentación numérica de resultados mediante gráficas y tablas, se realizan algunos comentarios relacionados con los resultados obtenidos proponiendo a su vez posibles explicaciones para los comportamientos observados. Adicionalmente se incorpora en la parte final de este capítulo, una sección destinada a correlacionar los resultados obtenidos con el comportamiento teórico que se puede esperar en las mezclas de acuerdo a los resultados recopilados en laboratorio y tomando como referencia la experiencia y resultados que indica la bibliografía relacionada con el comportamiento de las mezclas asfálticas.

Finalmente, en el capítulo 6, se enuncian los resultados y conclusiones más importantes que se han obtenido en la presente investigación. También se adjuntan recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas.

1. Antecedentes generales

1.1 Planteamiento del Problema

Actualmente el medio principal de transporte, tanto de personas como de bienes y servicios, es mediante la circulación de vehículos motorizados en carreteras. Durante las últimas décadas, se ha desatado un aumento considerable de los volúmenes de tráfico, dando paso al incremento de las cargas que llegan al pavimento. Esto ha hecho patente la importancia de buscar alternativas sustentables para el diseño y construcción de estas estructuras, logrando que sean más duraderas, económicas y amables con el medio ambiente.

Durante los últimos años la industria asfáltica ha experimentado un continuo desarrollo tecnológico que ha permitido responder a distintas exigencias tanto constructivas como de rendimiento y desempeño. La investigación sobre materiales sostenibles implica la obtención de nuevos métodos que puedan tratar aspectos ambientales como el calentamiento global. En este sentido el impacto provocado por la producción de mezclas asfálticas sobre la calidad del aire se debe fundamentalmente al empleo de altas temperaturas en su fabricación en planta y posterior puesta en obra [4].

Para concientizar a los países en la reducción de las concentraciones de gases de efecto invernadero, producido por las emisiones de sustancias como el dióxido de carbono (CO₂); y atenuar el calentamiento global, se adoptó el Protocolo de Kioto, en la tercera sesión de la Convención de las Naciones Unidas para el Cambio Climático. Este tratado tuvo el propósito de reducir los niveles de emisión de CO₂ correspondientes al año 1990, en un 5,2% entre el 2008 y el 2012. La Unión Europea se planteó la reducción de estas emisiones en un 15% para el año 2010 [5].

Durante la realización de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático en 2012, se aceptó extender hasta 2020 el Protocolo de Kioto, en un pacto que limita la liberación de gases de invernadero de algunos países desarrollados, pero que sólo cubrirá un 15% de las emisiones globales. Esta extensión fue adoptada por casi 200 países, sin embargo, este proceso denotó un débil compromiso de los países más industrializados [5].

La puesta en marcha del Protocolo de Kioto ha permitido una reducción del 22,6% en las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a los niveles de 1990 en 37 países industrializados y la UE, cuando el compromiso inicial era de una disminución del 5% [5].

Es por esto, que desde hace varios años la industria asfáltica ha venido desarrollando nuevos productos y procedimientos que conlleven al ahorro energético y la disminución de la contaminación ambiental, los cuales han sido enfocados especialmente en la fabricación de mezclas a temperaturas inferiores a las convencionales mezclas en caliente. Para lograr este objetivo, el propósito más reciente lo constituyen los procesos de “mezclas asfálticas tibias” (MAT) o “warm mix asphalt” (WMA) en inglés. Estas mezclas tibias pueden ser fabricadas a temperaturas del orden de los 30 °C a 40 °C por debajo de las utilizadas para las mezclas tradicionales en caliente, gracias al empleo de determinados procedimientos y/o aditivos incorporados. La reducción de la temperatura de mezclado, disminuye significativamente el envejecimiento del ligante asfáltico, generando un asfalto menos oxidado y por consiguiente más blando que presenta una mayor resistencia a la falla por agrietamiento térmico [6].

Algunos estudios [7] indican que los aditivos de mezclas tibias promueven una mejora en la compactación de las mezclas, permitiendo reducir los esfuerzos requeridos para la compactación. Esta característica en conjunto con el efecto de menor envejecimiento del asfalto, por el mezclado a menor temperatura, permiten aumentar los contenidos de asfaltos reciclados (RAP).

Pero el beneficio más evidente de la reducción de la temperatura de mezclado, corresponde al ahorro de combustible, lo que además conlleva a una disminución de las emisiones de dióxido de carbono equivalente al ambiente y una disminución de los olores generados en las plantas y sitios de pavimentación [6]. En cuanto a la reducción del consumo, se han reportado valores entre 20% a 35% de ahorro dependiendo del tipo de tecnología utilizada, contenido de humedad y eficiencia de la planta. Estos porcentajes equivalen a una reducción de aproximadamente 1,5 a 2 litros de combustible por tonelada de mezcla, aumentando el ahorro en la utilización de material reciclado [8].

Las rigurosas normas medioambientales aplicadas a la industria de la construcción, así como el costo elevado y constante de combustible en los últimos años llevó a un crecimiento acelerado en la aplicación de estas tecnologías MAT durante la última década [9].

Para la implementación de esta nueva tecnología, existe una amplia gama de procesos y aditivos, dentro de los cuales se ha estudiado recientemente la incorporación de zeolitas sintéticas. Estas son minerales definidos como aluminosilicatos hidratados de sodio, calcio, magnesio, potasio y otros alcalinos. Poseen grandes cavidades en su estructura cristalina que permiten almacenar moléculas de agua y una de sus principales características es la capacidad de deshidratación reversible. En la producción de mezclas asfálticas tibias, la zeolita es introducida en conjunto o justo antes de que el asfalto sea incorporado al tambor de mezclado, en donde el contacto con material a temperaturas sobre los 100°C permite que la zeolita libere las moléculas de agua almacenadas en su estructura, generándose un micro-espumado que produce un aumento de volumen del asfalto. Este efecto de expansión del asfalto permite un recubrimiento óptimo del agregado pétreo a menores temperaturas [7]. El estudio y aplicación de la zeolita en mezclas asfálticas se ha enfocado en zeolitas sintéticas, sin embargo, existen algunas investigaciones relacionadas con el uso de zeolitas naturales [6,10,11] y en base a ellas es posible afirmar la factibilidad de realizar el mezclado de un ligante asfáltico con el agregado pétreo y la incorporación de zeolitas naturales a temperaturas dentro del rango de producción de mezclas de asfalto calientes y tibias.

Pero, a pesar de las ventajas comentadas por diversos investigadores, el uso de las mezclas asfálticas tibias aún se encuentra en etapa preliminar incluso en las naciones de origen. Teniendo en cuenta que la primera carpeta generada a partir de estas tecnologías se desarrolló en 1999, no es posible conocer aún su comportamiento a largo plazo, además, se debe tener en cuenta que las pruebas elaboradas en Europa se encuentran en su mayoría auspiciadas por empresas privadas, que tienen sus intereses puestos en el buen funcionamiento de su producto [7].

Más aún, el estudio del comportamiento de mezclas asfálticas con adición de zeolita natural chilena se encuentra en una fase inicial ya que a la fecha de redacción de este texto sólo se ha encontrado una investigación [6] que reporta la evaluación de zeolita natural chilena en la reología de un cemento asfáltico, manteniéndose así muchas interrogantes frente al desempeño que pudiesen tener este tipo de mezclas. Por su parte, debido al menor costo de la zeolita natural en relación a su similar sintético y la existencia de yacimientos chilenos de dicho mineral, es que se hace necesaria la investigación para identificar las propiedades, el desempeño y la respuesta que puedan tener estas mezclas.

Así, dado que existen estudios recientes [6] que indican la factibilidad del uso de zeolita natural chilena de clasificación clinoptilolita en la producción de mezclas asfálticas y, por otro lado, los múltiples beneficios que otorga la reducción de la temperatura de producción de este tipo de mezclas, es que surge la necesidad de estudiar la influencia que puede tener la incorporación de zeolita natural chilena en los parámetros volumétricos y mecánicos generalmente considerados para el diseño de mezclas y capas asfálticas, pues a la fecha no existen estudios enfocados a ello.

Tomado en cuenta el escenario antes descrito y en atención a la necesidad de ahondar en el comportamiento de mezclas asfálticas con zeolita natural, la presente investigación se trazó como objetivo general evaluar experimentalmente las propiedades volumétricas y mecánicas, consideradas por el método de diseño Marshall, y también determinar la resistencia a tracción indirecta de mezclas asfálticas con incorporación de zeolita natural chilena. También se estudió su efecto en la obtención del porcentaje óptimo de asfalto.

Se espera que esta investigación sea un aporte en la identificación de propiedades, desempeño y comportamiento que puedan tener las mezclas con incorporación de zeolita natural chilena y constituya un avance en la validación de las mezclas asfálticas tibias como una alternativa real a las mezclas asfálticas en caliente convencionales.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general:

Evaluar experimentalmente las propiedades volumétricas y mecánicas, consideradas por el método de diseño Marshall, y la resistencia a tracción indirecta de mezclas asfálticas con incorporación de zeolita natural chilena y su efecto en la obtención del porcentaje óptimo de asfalto.

1.2.2 Objetivos específicos:

- Determinar la incidencia que tiene la incorporación de zeolita natural chilena en la obtención del contenido óptimo de asfalto en una mezcla asfáltica en caliente diseñada mediante el método Marshall.
- Estimar el efecto de la incorporación de zeolita natural chilena, en dosis variable, en la densidad, estabilidad, fluencia y vacíos de mezclas asfálticas tibias y calientes.
- Precisar la influencia de la incorporación de zeolita natural chilena, en diversas dosis, en la resistencia a tracción indirecta de mezclas asfálticas tibias.

1.3 Variables de estudio

Las variables dependientes, cuyas variaciones fueron cuantificadas y analizadas son las siguientes:

- Densidad de la mezcla asfáltica compactada
- Estabilidad de la mezcla asfáltica compactada
- Fluencia de la mezcla asfáltica compactada
- Porcentaje de vacíos en el agregado mineral
- Porcentaje de huecos de la mezcla asfáltica compactada
- Porcentaje óptimo de asfalto
- Resistencia a tracción indirecta

Dichas variables son definidas con mayor detalle en el capítulo 3 denominado “Diseño experimental”.

1.4 Alcances de la investigación

- La banda granulométrica de los áridos combinados que se utilizan en la fabricación de las diversas mezclas asfálticas corresponde a una granulometría semidensa según los límites establecidos en la tabla 5.408.201.F del Manual de Carreteras, Volumen 5.
- El Asfalto que se emplea en la fabricación de todas las mezclas asfálticas es un cemento asfáltico CA-24 60/20.
- La zeolita que se utiliza en la presente investigación corresponde a un aluminosilicato de origen natural del tipo clinoptilolita-mordenita, procedente de un yacimiento ubicado en la localidad de Quinamávida comuna de Colbún, Linares, VII Región del Maule, Chile. Esta zeolita se compone principalmente de SiO_2 y Al_2O_3 , conteniendo además pequeñas cantidades de Fe_2O_3 y de CaO entre otras sustancias.

- Las temperaturas de mezclado y compactación para las mezclas asfálticas denominadas “calientes” (MAC) corresponden a 165°C y 150°C respectivamente. Por su parte las temperaturas de mezclado y compactación para las mezclas denominadas “tibias” son de 135°C y 125°C, respectivamente.

Mayores antecedentes acerca de la granulometría, cemento asfáltico, zeolita y temperaturas de trabajo, son expuestos en el capítulo 3 denominado “Diseño experimental”.

1.5 Metodología de investigación

La presente investigación es de tipo experimental en donde se ha realizado una serie de ensayos de laboratorio a mezclas asfálticas compactadas, con el fin de estimar en ellas propiedades volumétricas y mecánicas que permitan caracterizarlas y determinar posibles comportamientos. En este sentido, se han establecido variables de control como constantes presentes en todas las mezclas asfálticas analizadas, y variables dependientes en donde se verifican los efectos de la manipulación controlada de una variable independiente.

El enfoque de análisis de los datos generados por la aplicación de ensayos, es principalmente de tipo cuantitativo ya que en primera instancia se busca medir y cuantificar las variables mencionadas en el punto 1.3 de este capítulo. No obstante, con el fin de enriquecer el análisis de los resultados, se ha incorporado también un análisis de carácter cualitativo en relación a las características que representan las magnitudes medidas y que determinan ciertos comportamientos en las mezclas asfálticas analizadas.

En cuanto al diseño y ejecución de las actividades experimentales, se han incorporado en el presente texto dos capítulos que describen en detalle las metodologías y procedimientos seguidos. El primero de ellos, el Capítulo 3, denominado “Diseño experimental”, describe cómo se estructura la actividad experimental y sus etapas, se definen las variables involucradas y cómo se evaluaron. El otro capítulo, titulado “Desarrollo Experimental”, da a conocer la fase operativa de la investigación, que implica todo el trabajo realizado en laboratorio para determinar y evaluar las variables descritas en el capítulo anterior. Por tal motivo, en esta sección sólo se abordarán los aspectos generales de la metodología seguida, definiendo brevemente las dos etapas del plan experimental en el punto 1.5.1.

En términos generales la presente investigación se estructura según se muestra en el diagrama de la Figura 1.1 (página siguiente).



Figura 1.1 – Esquema general de la metodología de investigación aplicada.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

1.5.1 Plan Experimental

Como se aprecia en el esquema de la Figura 1.1, una vez identificada la problemática de investigación, establecidos los objetivos y definidas las variables de estudio, se diseñó y ejecutó un plan experimental relacionado con la aplicación de los ensayos que permitieron cuantificar las variables.

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados en esta investigación, el plan experimental se divide en 2 etapas.

La primera etapa permite obtener información referente a la influencia que tiene la incorporación de zeolita natural chilena en la obtención del porcentaje óptimo de asfalto en una mezcla en caliente que es diseñada mediante el método Marshall. Los resultados que se obtienen referentes a propiedades volumétricas, propiedades mecánicas y porcentaje óptimo de asfalto son comparados con los resultados obtenidos en el diseño de la mezcla patrón (MAC Patrón). La incorporación de zeolita en la mezcla que es diseñada y ensayada en esta etapa es en granulometría fina y el porcentaje que se incorpora corresponde a un 0,3% con respecto al peso del árido mineral.

La segunda etapa busca generar los datos que permitan comparar, entre una mezcla asfáltica en caliente (mezcla patrón) y mezclas asfálticas tibias con adición de zeolita natural chilena, las propiedades volumétricas y mecánicas consideradas por el método de diseño Marshall y la resistencia a tracción indirecta, manteniendo como constantes la banda granulométrica utilizada y el porcentaje de asfalto. La incorporación de zeolita en las mezclas que son ensayadas en esta etapa es en granulometría fina incorporada en diversos porcentajes.

Los porcentajes de zeolita incluida en cada mezcla corresponden a una parte de la banda granulométrica, es decir, la zeolita reemplaza, en peso proporcional, al árido cuyo tamaño presente en la granulometría empleada coincide con el tamaño de la zeolita que se incorpora.

En el capítulo 3, denominado "Diseño experimental", se explica con mayor detalle las etapas del plan experimental.

1.5.2 Muestras

Las muestras sobre las cuales se midieron propiedades y/o aplicaron los ensayos, corresponden a las mezclas asfálticas diseñadas y fabricadas, y a los materiales que las componen. A su vez, en el caso de las mezclas asfálticas, los ensayos fueron aplicados a las probetas diseñadas que cumplieran con los requisitos señalados en el Manual de Carreteras, Volúmenes 5 y 8. (Apéndice 1 al 4).

1.5.3 Instrumentos de investigación

Para la recopilación de los datos se utilizaron los ensayos prescritos por el Manual de Carreteras referentes al Método de diseño Marshall y el Ensayo de Tracción Indirecta (Apéndice 1 al 4). Estos ensayos fueron elegidos conforme a las necesidades de la investigación y para obtener la información que permitió explorar el comportamiento de las mezclas asfálticas con adición de zeolita natural chilena.

Además de la experimentación propiamente tal, se utilizó la observación como instrumento secundario que permitió identificar dificultades operacionales en los procesos de diseño y ensaye, que surgieron como consecuencia de la incorporación de zeolita.

1.5.3 Análisis de datos

Una vez obtenidos los datos y tabulados convenientemente mediante gráficas y tablas, se procedió a la interpretación mediante comparaciones entre los datos generados por las distintas mezclas asfálticas para detectar patrones, características y/o comportamientos posibles en la vida en servicio de dichas mezclas. También se verificó la existencia de réplica de resultados entre mezclas asfálticas con diversos porcentajes de zeolita.

Para efectos de validar estadísticamente las diferencias encontradas, se realizó un análisis estadístico mediante el programa computacional IBM SPSS Statistics Versión 20, consistente en la obtención de medidas de tendencia central, medidas de dispersión, análisis de varianzas y comparaciones múltiples entre grupos de probetas. El intervalo de confianza utilizado fue del 95% ($\alpha = 0,05$).

2. Marco teórico, empírico y estado del arte

En el presente capítulo se exponen primeramente algunos antecedentes generales relacionados con la producción de mezclas asfálticas y otros antecedentes concernientes al estado actual de la tecnología e investigación relacionada con el tema de estudio

También se presentan algunos fundamentos teóricos relacionados con las propiedades y rendimiento de las mezclas asfálticas, así como aquellos antecedentes que contextualizan la investigación.

Así mismo se muestra un conjunto de conocimientos empíricos y referencias desprendidas de investigaciones realizadas que se relacionan con antecedentes técnicos, principios de funcionamiento de mezclas tibias con procesos de espumado indirecto y los productos comerciales que utilizan zeolitas sintéticas.

2.1 Antecedentes generales

La industria de las mezclas asfálticas y pavimentos flexibles se ha orientado en la actualidad a encontrar mejoras tecnológicas que, en cierta manera, mejoren el rendimiento de los materiales, aumenten la eficiencia constructiva, conserven y respeten los recursos a utilizar y la hagan estar a la vanguardia del avance medioambiental [1]. La producción y colocación de las mezclas asfálticas ha evolucionado durante los últimos 130 años, pasando de la mezcla y colocación a mano con palas, a las plantas de alimentación, con equipos de compactación, mezclas y extendido altamente automatizados. Durante este periodo, ha sido ampliamente aceptado el hecho de que el control de la temperatura es crucial para el recubrimiento del árido, la estabilidad de la mezcla durante la producción y el transporte, facilidad de colocación, y en última instancia para el rendimiento del asfalto. Durante la colocación de las mezclas, la temperatura debe ser lo suficientemente alta como para asegurar la trabajabilidad de las mezclas, pero al mismo tiempo debe de estar por debajo del límite que provoque excesivo envejecimiento del ligante [2].

En este sentido, existen a nivel mundial varias tecnologías que permiten la fabricación de mezclas asfálticas a menores temperaturas que las tradicionales mezclas en caliente aunque su uso solo se ha masificado principalmente en Europa y Norte América. A partir del estudio de todas las tecnologías que actualmente se encuentran en uso, diversas clasificaciones pueden realizarse para intentar agrupar los distintos productos que se comercializan.

A continuación veremos una clasificación que se basa en los diferentes rangos de reducción de temperatura que se consiguen. Directamente relacionados con estos rangos de reducción se puede hallar el consumo de combustible por tonelada. Así pues, recogiendo la amplia gama de mezclas que pueden producirse, la clasificación tendría la forma siguiente [4,12,13]:

- Mezclas frías (Cold Mixes): Se trata de aquellas mezclas asfálticas producidas a temperatura ambiente (hasta los 40°C), y que para conseguir la trabajabilidad adecuada utilizan emulsiones, o asfalto espumado.
- Mezclas semicaliente (Half - Warm Mix Áspala): Este tipo de mezclas se caracteriza porque su temperatura de producción no supera en ningún momento la temperatura de ebullición del agua (100°C), usando para ello en la mayoría de los casos la humedad de los áridos.
- Mezclas tibias (Warm Mix Áspala): Se mueven en un rango de producción que varía desde temperaturas poco superiores a los 100°C, hasta los 140°C.
- Mezclas calientes (Hot Mix Áspala): Las más extendidas por tradición, son todas aquellas cuya temperatura de producción supera los 160°C. Como se ha comentado anteriormente,

son necesarias estas elevadas temperaturas de modo que se consiga la manejabilidad adecuada de las mezclas, así como el mejor recubrimiento de los áridos.

En el gráfico que se presenta en la Figura 2.1 es posible visualizar los rangos anteriormente mencionados, con su correspondiente gasto de combustible (aproximado) por tonelada de producción.

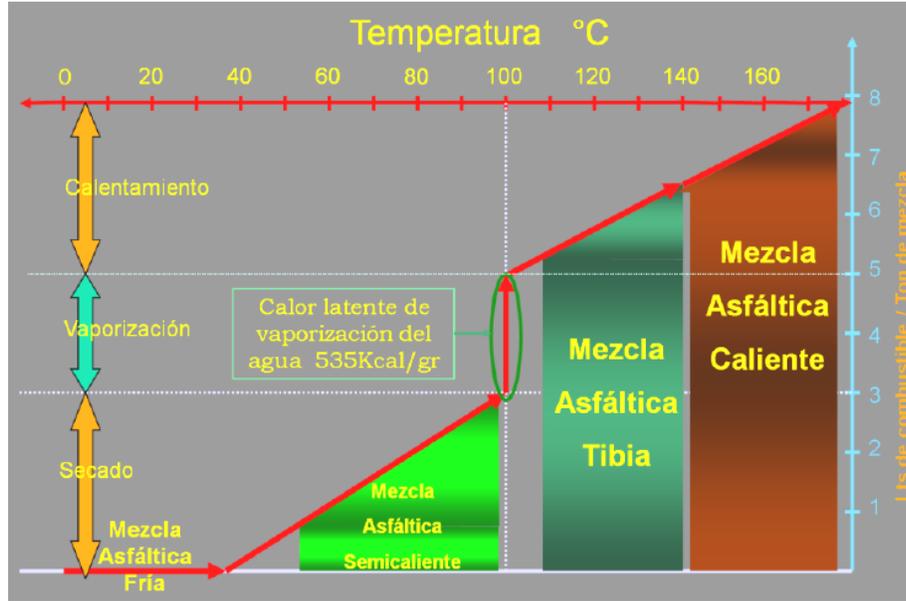


Figura 2.1 – Clasificación de las mezclas asfálticas según temperatura de producción. Fuente: D'Angelo J. [et al], [14].

2.2 Situación actual en Chile referente al uso y producción de mezclas asfálticas

El uso de mezclas asfálticas en nuestro país está ligado principalmente a la construcción de pavimentos flexibles, ya sea como capas que aportan estructura y conforman un pavimento asfáltico como tal o simplemente como tratamientos superficiales que rehabilitan pavimentos dañados o protegen superficies de suelo granular. En la Figura 2.1 se muestra una sección tipo de pavimento flexible utilizada en Chile que muestra las tres capas que puede contener un pavimento asfáltico.

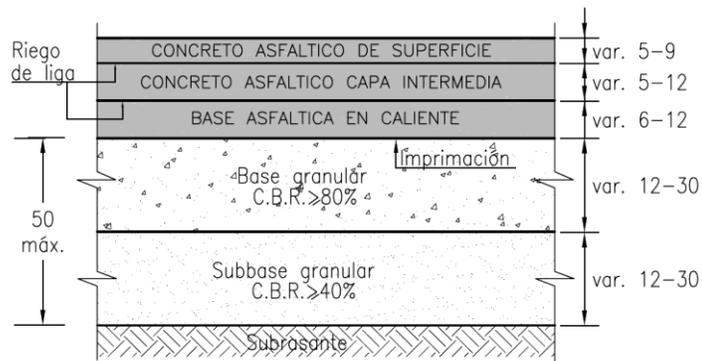


Figura 2.2 – Estructura tipo de un pavimento flexible. Dimensiones en centímetros. Fuente: Manual de Carreteras, volumen 4, 2016, [15].

Si bien es cierto que a nivel mundial existe una amplia gama de productos asfálticos y nuevas tecnologías para satisfacer las necesidades y requerimientos constructivos de pavimentos flexibles, tradicionalmente en nuestro país se han utilizado las mezclas asfálticas en caliente como el principal material para la construcción de capas estructurales en pavimentos asfálticos y en menor grado las mezclas frías aun que estas últimas son utilizadas por lo general en tratamientos superficiales o capas que resisten tráficos bajos o medios.

A continuación se describen brevemente las mezclas asfálticas que actualmente son consideradas por la normativa Chilena [16,17]. Se han excluido los riegos asfálticos y sellos asfálticos que no constituyen una mezcla asfáltica ya que no poseen un proceso de mezclado previo con algún árido mineral, aún cuando son depositados sobre o bajo alguna capa de árido mineral.

Mezclas asfálticas en caliente (MAC): Corresponden a cementos asfálticos mezclados con áridos en planta a temperaturas por sobre los 150 °C, constituyendo una mezcla que debe ser compactada por medios mecánicos luego de ser depositada en el lugar que prestará servicio. Las mezclas podrán ser de granulometría densa, semidensa, gruesa, abierta o fina. Nos referiremos con más detalle a este tipo de mezcla asfáltica en el punto 2.3.

- Microaglomerados discontinuos en caliente: Se definen como mezclas asfálticas discontinuas aquéllas confeccionadas con ligante modificado, polvo mineral (*filler*) y áridos que presenten una discontinuidad granulométrica en los tamices inferiores del árido grueso. Se emplean como capa de rodadura para proporcionar o restituir las características superficiales de los pavimentos, tales como resistencia al deslizamiento, drenaje superficial, baja sonoridad, comodidad y seguridad del usuario. Cabe señalar que actualmente en Chile no se encuentra plenamente disponible esta técnica dado que solo en algunas regiones existe la infraestructura de fabricación y control necesaria para su correcta ejecución.
- Mezclas stone mastic asphalt (sma): Consiste en una mezcla constituida por un fuerte esqueleto mineral compuesto por un alto contenido de gravilla triturada, bajo contenido de arena y elevada dosis de ligante asfáltico que junto al *filler* y fibras de celulosa conforman una “masilla” (*mastic*) que cohesiona la estructura mineral y da lugar a una mezcla asfáltica de gran resistencia al desgaste superficial e impacto. Al igual que la mezcla anterior, esta es otra técnica que aún no se encuentra plenamente disponible en todas las regiones de Chile para por falta de infraestructura de fabricación.
- Mezcla asfáltica drenante: Capa asfáltica drenante y antideslizante, confeccionada con cemento asfáltico modificado con polímero.
- Mezclas asfálticas en caliente modificadas con polvo de caucho: Capas de pavimento constituidas con mezclas asfálticas en caliente modificadas con polvo de caucho (NFU) incorporado al árido mineral antes del mezclado con asfalto (método de vía seca). El polvo de caucho modifica las propiedades reológicas del asfalto de una manera similar a las mezclas con asfalto modificado con polímeros nuevos, aunque en menor grado.
- Mezclas asfálticas en caliente con rap: Corresponden a mezclas asfálticas en caliente con incorporación de un porcentaje de mezcla asfáltica recuperada (RAP). Pueden ser de granulometría semidensa o gruesa según su uso como capa de rodadura o base intermedia en un pavimento asfáltico.

Mezclas asfálticas en frío (MAF): Son mezclas de áridos no calentados, mezclados con asfaltos cortados, espumados directos o emulsiones asfálticas. Si bien el ligante puede ser precalentado, el resto de las operaciones se llevan a cabo a temperatura ambiente. Las mezclas asfálticas en frío pueden usarse para capas superficiales o como base, si la estructura del pavimento es diseñada adecuadamente. Las capas superficiales en frío son convenientes para tráfico ligero y mediano. Cuando se usan como capa intermedia o base, pueden ser convenientes para todos los tipos de

tráficos. Los pavimentos en frío tienen especiales ventajas en áreas alejadas: donde existen problemas económicos en la colocación de grandes volúmenes.

- Lechada asfáltica y Micropavimento: La lechada asfáltica es una mezcla compuesta por emulsión asfáltica de quiebre lento, árido bien graduado, polvo mineral (*filler*) y agua. Eventualmente, se puede incorporar algunos aditivos, si se requieren. El micropavimento posee los mismos componentes que la Lechada asfáltica, pero la emulsión utilizada es modificada con polímeros y los áridos son de mayor calidad mecánica que los utilizados en las lechadas, por lo cual, el micropavimento es utilizado en vías importantes. En actividades de conservación, se aplican principalmente para sellar la superficie del pavimento, rellenando las grietas superficiales de baja severidad y defectos menores. Se utilizan también para detener el desgaste superficial y para mejorar la adherencia entre el pavimento y el neumático.
- Sello bituminoso premezclado: Se fabrican en base a emulsiones, agregados minerales y puede contener aditivos poliméricos. Se utilizan sobre pavimentos asfálticos antiguos o nuevos, que no presenten fallas estructurales, deformaciones o exudación. Su aplicación permite sellar la superficie de rodadura, protegiéndola del deterioro causado por factores externos, como las aguas lluvias, oxidación por rayos solares (UV), abrasión generada por los neumáticos y algunos agentes químicos, prolongando su periodo de servicio en buenas condiciones.
- Cape Seal: Es aquel tratamiento resultante de la aplicación de una primera capa de Sello de Agregado (aplicación de un riego de emulsión asfáltica convencional o modificada, seguido de una cobertura de agregados monogranulares) y la aplicación de una segunda capa compuesta por una lechada ó micropavimento asfálticos.
- Mezcla asfáltica reciclada y estabilizada con asfalto espumado: Se obtienen del tratamiento con asfalto espumado y aditivo que se realiza al material obtenido del proceso de pulverizado de un pavimento existente o capa granular. Esta tecnología corresponde a un reciclado en frío, en sitio. La tecnología de asfalto espumado a la que se hace referencia aquí, es al proceso de inyección de agua en forma directa a un cemento asfáltico caliente. El proceso de fabricación de este tipo de mezcla requiere el uso de maquinaria especial que contenga una unidad fresadora que tritura el pavimento a reciclar y boquillas inyectoras de asfalto y agua para producir el efecto de espumación.

Bases abiertas ligadas con asfalto: Son bases drenantes de graduación abierta constituidas por materiales granulares ligados con cemento asfáltico o emulsiones asfálticas, y que normalmente sirven de apoyo a pavimentos de concreto asfáltico o de hormigón. Constituyen una MAC si en su fabricación se utiliza cemento asfáltico o una MAF si el ligante utilizado es una emulsión asfáltica.

Como se puede apreciar, las mezclas asfálticas que contemplan recomendaciones y especificaciones por parte del Ministerio de Obras Públicas (MOP) y del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), son mezclas en caliente y mezclas en frío. En estos dos tipos de mezcla se basan las tecnologías que se utilizan mayormente en los proyectos públicos de infraestructura vial que contemplan pavimentos flexibles y los proyectos o actividades de mantenimiento y conservación de calzadas con productos asfálticos.

No obstante lo anterior, en los últimos años han existido iniciativas gubernamentales y privadas tendientes a investigar y poner a prueba nuevas tecnologías que permitan implementar en Chile una industria más sustentable y amistosa con el medio ambiente. Hoy en día la industria del asfalto ya está realizando mezclas a más baja temperatura que las tradicionales en caliente, alcanzando un ahorro considerable en combustible. También existen acercamientos hacia un uso más masivo de técnicas de reciclaje de pavimentos [18].

En este contexto, la técnica de asfalto espumado por vía directa, por ejemplo, fue aplicada por primera vez el año 2002. El MOP, con el apoyo del DICTUC, decidió construir el primer proyecto

aplicando esta tecnología en Chile en 28 kilómetros de la carretera Panamericana Norte, al sur de la ciudad de Copiapó, III Región. Con posterioridad se replicó la experiencia en Illapel, Región de Coquimbo, en el año 2006 y en un tramo de la Ruta 5 Norte de Antofagasta, en el año 2008.

El tema de la sustentabilidad ha sido abordado de manera bastante amplia por la industria del asfalto a nivel mundial, y Chile se está incorporando también a esta tendencia, por lo cual se están haciendo esfuerzos conjuntos con los principales mandantes estatales (MOP y Minvu), los principales mandantes privados (concesionarias) y el mundo académico para tratar de avanzar rápidamente en la incorporación e implementación de nuevas técnicas que apuntan claramente a bajar los niveles de emisión y consumo de energía, por ejemplo, además de otras técnicas como la utilización de mezclas fonoabsorbentes, mezclas con asfalto caucho y uso de las técnicas de reciclado de pavimentos [18].

Cabe señalar también que existen en Chile numerosos productos comerciales que se pueden incorporar a las mezclas antes mencionadas y que les confieren mejoras que potencian su rendimiento.

Por su parte también funcionan actualmente en nuestro país empresas productoras de mezclas asfálticas que poseen la capacidad para desarrollar mezclas especiales que respondan a las necesidades específicas de sus clientes. No obstante, toda mezcla asfáltica de carácter especial que es ofrecida por estas empresas y que eventualmente escape a las indicaciones de normas técnicas actuales, son fabricadas para propiedades y usos de privados.

En cuanto al diseño y producción de las mezclas asfálticas, en general se realiza siguiendo las especificaciones y normas técnicas establecidas en el Manual de Carreteras del MOP en sus volúmenes número 5 y 8 titulados "*Especificaciones Técnicas Generales de Construcción*" y "*Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control*", respectivamente. También existen especificaciones especiales del MINVU en su "*Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación*". Las especificaciones relacionadas con el diseño de las mezclas frías son variadas y se relacionan con el tipo de mezcla en específico y con el tipo de asfalto utilizado. Por su parte, las mezclas en caliente son diseñadas mediante el Método Marshall al cual nos referiremos con más detalle en el punto 2.3.3.

2.3 Mezclas asfálticas en caliente (MAC)

Una mezcla asfáltica en caliente consiste en una combinación de agregados uniformemente mezclados recubiertos por cemento asfáltico. Para secar los agregados y obtener suficiente fluidez del cemento asfáltico como para lograr adecuada trabajabilidad y mezclado, tanto el agregado como el asfalto deben ser calentados antes del mezclado; de ahí el término "mezcla en caliente".

Los agregados y el asfalto son combinados en una planta de mezclado en la cual todos los materiales constituyentes son calentados, proporcionados y mezclados a temperaturas por sobre los 150°C para producir la mezcla de pavimentación asfáltica deseada.

Después que el mezclado en planta se completa, la mezcla es transportada al lugar de la pavimentación y distribuida por una pavimentadora en una capa ligeramente compactada para obtener una superficie uniforme y pareja. Mientras la mezcla está aún caliente, el material es compactado más intensamente por rodillos pesados accionados a motor para producir una capa lisa y bien consolidada.

La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, para que en el proceso de mezclado se obtenga un cubrimiento perfecto y para poder compactarla formando una masa densa y uniforme, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente [19].

Dado su uso ampliamente extendido por sobre cualquier otro tipo de mezcla asfáltica, son denominadas también como mezclas convencionales o tradicionales.

2.3.1 Propiedades de las MAC

La selección apropiada de los componentes de la mezcla y sus proporciones requiere un conocimiento de las propiedades más significativas y las características del comportamiento de las

mezclas asfálticas, así como el efecto que puedan causarle sus componentes. Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas [19]. Las propiedades fundamentales que deben tener las mezclas asfálticas son las siguientes:

- Trabajabilidad: Se refiere a la capacidad que tenga la mezcla para ser colocada y compactada con facilidad, en el lugar donde prestara servicio.
- Durabilidad: Propiedad de la mezcla que hace que el pavimento sea capaz de resistir la desintegración debido al tránsito y al clima. Éste último, afecta principalmente al asfalto de la capa superficial por estar en contacto con el sol, el aire y el agua, pues produce que este material pierda las propiedades aglutinantes, se oxide, se envejezca y endurezca, afectando la vida útil del pavimento.
- Estabilidad: Se refiere a la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir las cargas de tránsito sin que se produzcan deformaciones. Esta propiedad depende de la cohesión de la mezcla y de la fricción interna.
- Flexibilidad: Capacidad de la mezcla de adaptarse a las deformaciones por asentamientos de la base y subrasante, sin agrietarse.
- Resistencia a la fatiga: Capacidad del pavimento asfáltico de soportar esfuerzos provocados por el tránsito en repetidas pasadas.
- Impermeabilidad: Las mezclas deben ser en lo posible totalmente impermeables, de manera que el agua superficial no pueda atravesar hacia las capas inferiores, evitando con ello que éstas puedan perder capacidad de soporte.
- Resistencia al deslizamiento: Capacidad del pavimento asfáltico de ofrecer resistencia al resbalamiento o deslizamiento, especialmente cuando está húmedo.

Dado que las propiedades antes mencionadas son características que dotarán a la mezcla asfáltica de un adecuado desempeño en su vida de servicio, es claro que toda tecnología que apunte a mejorar el rendimiento de las mezclas asfálticas en caliente o que pretenda ser una alternativa a estas, deberá también poseer las características deseables en cualquier mezcla asfáltica de uso vial.

2.3.2 Métodos volumétricos de diseño

El diseño de mezclas asfálticas para pavimentación, como cualquier diseño de ingeniería de materiales, es una cuestión de selección y proporciones de materiales para obtener las cualidades y propiedades deseadas una vez finalizada la construcción. El objetivo general es una mezcla y graduación de agregados económicos (dentro de las exigencias de las especificaciones) y un contenido de asfalto adecuado que produzca una mezcla que posea lo siguiente:

- Asfalto suficiente para asegurar un pavimento durable a través del total recubrimiento de los agregados pétreos y trabazón de las partículas, bajo una adecuada compactación.
- Estabilidad suficiente de la mezcla para satisfacer los requerimientos de servicio y las demandas del tráfico sin deformación o desplazamiento.
- Porcentaje de huecos en la mezcla total compactada suficiente para absorber la consolidación producto del amasado del tránsito.
- Adecuada trabajabilidad para permitir una operación de construcción eficiente en la colocación de la mezcla para pavimentación.

Previo al diseño de la mezcla, es necesario que todos los materiales constituyentes, agregados y asfaltos, sean analizados para decidir si son aptos o no para formar parte de la mezcla, según la normativa vigente. El método de diseño más utilizado en Chile y el especificado para las mezclas en caliente, es el Método Marshall, el cual fue utilizado en esta investigación para diseñar las diversas mezclas que se fabricaron y ensayaron.

2.3.3 Método de diseño Marshall

Fue desarrollado por Bruce Marshall con el departamento de carreteras del estado de Mississippi, en 1939. En 1943 fue modificado por el cuerpo de ingenieros del ejército de USA para disertar mezclas de pavimentos para pistas de aterrizaje.

Este método sólo es aplicable a mezclas en caliente con cementos asfálticos que contengan agregados con tamaño máximo igual o inferior a 25 mm [20].

El propósito del Método de dosificación Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de áridos, y se basa en la determinación y análisis de la densidad y huecos de aire en las mezclas compactadas y en un ensaye de estabilidad y fluidez que mide la resistencia a la deformación plástica de las probetas confeccionadas.

El método implica realizar algunas determinaciones previas como densidades de los materiales que participan en la mezcla y de la mezcla sin compactar, la preparación de probetas de ensaye según especificaciones técnicas y la medición de la densidad de la mezcla compactada. Esto se realiza para cada contenido de asfalto a evaluar.

La compactación del material dentro de los moldes se realiza a través del martillo Marshall, que es un dispositivo de acero, formado por una base plana y circular de 3 $\frac{7}{8}$ " (98,4 mm) de diámetro, equipado con un peso de 10 [lb] (4.54 kg) y construido de modo de obtener una altura de caída de 18" (457,2 mm). Las probetas se compactan con 75 golpes por cara, o como se especifique según el tránsito de diseño.

El ensayo mecánico (Ensayo Marshall) consiste en romper probetas cilíndricas de 4" (101,6 mm) de diámetro por 2 $\frac{1}{2}$ " (63,5 mm) de altura, las cuales difieren en el porcentaje de asfalto. Suelen utilizarse al menos cinco contenidos de cemento asfáltico, variando entre uno y otro en 0,5%, tratando de estar por encima y por debajo del óptimo esperado. Para cada contenido de asfalto, se fabrican al menos tres probetas las que se preparan de acuerdo a un procedimiento específico de calentamiento, mezclado y compactación. Las temperaturas de mezclado y de compactación dependen del cemento asfáltico que se utilice para fabricar las probetas.

La estabilidad de la probeta es el valor de la carga máxima en Newton que alcanzará al ser ensayada a compresión lateral en la máquina de ensaye Marshall, la cual está diseñada para aplicar carga a las probetas a través de unas mordazas semicirculares a una velocidad de deformación de 50,8 mm por minuto. Las probetas deben encontrarse precalentadas mediante un baño de agua a 60 °C por un tiempo entre 30 y 40 min.

La fluidez es la deformación, en cuartos de milímetros, que ocurre desde el instante en que se aplica la carga hasta lograr la carga máxima.

En la Figura 2.3 (ubicada en página siguiente) se muestra una fotografía de un compactador automático de impacto (martillo Marshall) con base estacionaria para moldes de 4". También se adjunta una vista de la Máquina Marshall de aplicación de carga con indicador análogo de estabilidad y fluencia. Finalmente se presenta, en esta misma figura, el cabezal de ruptura o mordaza Marshall, que es utilizado para la aplicación de carga a las probetas de ensaye.



Figura 2.3 – (Izq.) Compactador automático de impacto (martillo Marshall) con base estacionaria para moldes de 4". (Centro) Máquina Marshall de aplicación de carga con indicador análogo de estabilidad y fluencia. (Der.) Cabezal de ruptura o mordaza Marshall.

Fuente: Catálogo Humboldt de Asfalto, 2015.

Con los valores obtenidos en los ensayos, y en base a los criterios definidos en el Manual de Carreteras en función del tipo de tránsito y el empleo de la mezcla, ya sea como carpeta de rodado, capa intermedia o capa base, se obtiene el porcentaje óptimo de asfalto y la mezcla de agregados pétreos que garantizan una buena estructura, los cuales deben cumplir con los requerimientos considerados por el diseño.

La importancia de este método radica en el compactador utilizado, asumiendo que simula la densidad que tiene la mezcla en terreno, siendo el principal objetivo de este método de diseño el determinar una mezcla económica de agregados y asfalto que cumpla con los requerimientos considerados para el correcto desempeño.

En resumen, este método, se basa en la medición y cálculo de algunas propiedades volumétricas y mecánicas, con las cuales se busca establecer un porcentaje óptimo de asfalto para confeccionar una mezcla que cumpla los criterios de diseño que se tengan para el tipo de capa asfáltica o pavimento que se construirá.

2.3.3.1 Propiedades consideradas en el método de diseño Marshall

Los cálculos y mediciones que se realizan en el método de diseño Marshall y que conllevan a la elección de un determinado contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de áridos, están enfocados hacia el análisis volumétrico de la mezcla asfáltica y la determinación de la resistencia a la deformación plástica de probetas cilíndricas cargadas sobre su manto lateral. A continuación se enuncian las propiedades y características consideradas por el método de diseño Marshall.

a) Densidad

La densidad de la mezcla compactada esta definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de mezcla). La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

En las pruebas y el análisis de diseño de mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3). La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ($1,000 \text{ kg/m}^3$). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio.

Esto se debe a que muy rara vez la compactación *in-situ* logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio [19].

b) Vacíos o huecos de aire (Va)

Los vacíos o huecos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional.

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre mas alta la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos [19].

c) Vacíos en el agregado mineral (VAM)

Los vacíos en el agregado mineral son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (es decir, todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuanto mayor sea el VAM, mas espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto mas gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla.

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se deben tener valores mínimos de VAM. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VAM por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VAM para economizar en el contenido de asfalto [19].

d) Estabilidad y fluencia

La estabilidad de una mezcla asfáltica corresponde a su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura aún al ser sometido a cargas que serán aplicadas durante su vida de servicio; un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no mas altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado.

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) esta relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del

asfalto. Un grado adecuado de fricción y cohesión interna, en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla.

Cuando no hay agregados disponibles con características de alta fricción interna, se pueden usar mezclas más económicas, en lugares donde se espere tráfico liviano, utilizando agregados con valores menores de fricción interna.

La fuerza ligante de la cohesión aumenta con aumentos en la frecuencia de carga (tráfico). La cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. Adicionalmente, y hasta cierto nivel, la cohesión aumenta con aumentos en el contenido de asfalto. Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdidas de fricción entre partículas. Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en el pavimento.

La fluencia representa la deformación de la mezcla asfáltica. En el ensayo Marshall de aplicación de carga, la deformación está indicada por la disminución en el diámetro de la probeta de ensayo. Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas, y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas del tránsito [19].

2.3.3.1 Contenido óptimo de asfalto

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios dictados por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay polvo mineral (*filler*). Los pequeños incrementos en la cantidad de polvo mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte del contenido de asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario: poco polvo mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda). Cualquier variación en el contenido de polvo mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco, o demasiado, polvo mineral, cualquier ajuste arbitrario, para corregir la situación, probablemente la empeorará. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá efectuar un muestreo y unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de mezcla.

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto. Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido; contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla. Generalmente se conoce la capacidad de absorción de las fuentes comunes de agregado, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas [19].

2.4 Mezclas asfálticas tibias (MAT)

2.4.1 Antecedentes Generales

Como ya hemos dicho, el control de la temperatura es crucial para el recubrimiento del árido, la estabilidad de la mezcla durante la producción y el transporte, facilidad de colocación, y en última instancia para el rendimiento del asfalto y la mezcla. Durante la colocación de las mezclas, la temperatura debe ser lo suficientemente alta como para asegurar la trabajabilidad de las mezclas, pero al mismo tiempo debe estar por debajo del límite que provoque excesivo envejecimiento del ligante [2].

Por lo tanto, resulta lógico que uno de los principales enfoques de investigación que se han llevado a cabo con objeto de conseguir las metas anteriormente mencionadas trate sobre la reducción de las temperaturas de producción de las mezclas asfálticas, donde el consumo energético y el daño ambiental son mayores [3,4]. Durante los últimos 20 años, se ha introducido, como resultado de estas investigaciones, el concepto de mezclas tibias, en inglés denominadas Warm Mix Asphalt (WMA). Se entiende por mezclas tibias aquellas que se producen a temperaturas menores que las calientes convencionales, en un rango que varía entre 20 y 55°C menos [1].

Los mismos mecanismos que permiten a las tecnologías MAT mejorar la trabajabilidad a menores temperaturas también les permiten actuar como agentes de compactación. La compactación mejorada o las densidades conseguidas *in situ* tienden a reducir la permeabilidad y el envejecimiento del asfalto, lo que en general se traduce en una mejora del rendimiento de las mezclas en términos de resistencia a la fisura y sensibilidad a la humedad [14]. Las tecnologías MAT también tienen el potencial de ser beneficiosas para la pavimentación en tiempos fríos o cuando hay que transportar las mezclas a grandes distancias antes de ser extendidas. La menor diferencia de temperatura entre las temperaturas de mezclado y ambiente da lugar a menores gradientes de temperatura. Dado pues que las mezclas tibias pueden ser compactadas a menores temperaturas, se dispone de más tiempo para llevar a cabo la compactación [21].

A pesar de las ventajas anteriormente mencionadas, existen aún algunas dudas o problemas relacionados a la implantación de estas mezclas. Así, el rendimiento a largo plazo de estas mezclas es desconocido, dado que los ensayos de campo no cuentan con más de 18 años de antigüedad, lo que en un primer momento puede crear reticencia en las autoridades como en las empresas del mundo del asfalto [22]. Además, la necesidad de equipos especiales, materiales concretos y aprendizaje por parte de los trabajadores suponen más complicaciones para estas mezclas. En ciertos productos, algunos problemas con la humedad, debido al indebido secado de los áridos, se han detectado [8].

Para el mejor entendimiento del impacto que estas mezclas pueden tener, sería bueno recordar el concepto de desarrollo sostenible, ampliamente aplicado y desarrollado actualmente. Según la Comisión de las Naciones Unidas, se entiende por desarrollo sostenible “aquel desarrollo que permite satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las sociedades futuras de satisfacer sus propias necesidades”. Por lo tanto, a partir de la anterior definición queda claro que el desarrollo sostenible no se centra solo en lo que a impacto ambiental se refiere, sino que aúna tres áreas independientes: desarrollo económico, desarrollo social y protección ambiental. Las mezclas tibias son consistentes con los ideales descritos por el desarrollo sostenible [5].

2.4.1.1 Historia

La idea de conseguir una reducción de temperatura a la hora de producir mezclas asfálticas no es nueva. Durante décadas, temas como ahorrar energía y reducir emisiones han sido discutidos, tratados e investigados ampliamente.

En 1956, el profesor Ladis H. Csanyi, doctor en Iowa State University, investigó acerca del potencial del asfalto espumado para uso como ligante de suelos. Desde entonces, la tecnología de asfaltos espumados, que permite reducir las temperaturas de mezclado, ha ido evolucionando y con ello ha permitido su uso con éxito en diferentes países [23].

En 1994, Maccarone experimentó desarrollos en mezclas frías basados en el uso de asfalto espumado y emulsiones de alto contenido de ligante. En aquel momento, el autor afirmaba que el uso de mezclas fría aplicadas a los trabajos de carreteras estaba ganando amplia aceptación. Tales sistemas son eficientes a nivel energético y menos dañinos para el medio ambiente, al no emitir hidrocarbonatos y usar menos combustible en su fabricación [22]. A pesar de poseer muchas ventajas y cualidades, las mezclas frías no han afectado la posición de las mezclas calientes como material dominante de pavimentación, ya que aún no se ha demostrado que desarrollen un rendimiento a largo plazo equiparable a dichas mezclas calientes.

En 1999, Jenkins *et al* [24] introdujeron un nuevo proceso, el tratamiento de asfalto espumado tibio. Sus documentos y estudios exploraron las consideraciones y posibles beneficios de calentar una amplia gama de áridos a temperaturas superiores a la ambiente, pero por debajo de los 100°C, antes de introducir el asfalto espumado en la mezcla. Los resultados de esta investigación mostraban un buen recubrimiento de las partículas de árido, así como una gran cohesión de las mezclas, un índice de tracción correcto y una compactación adecuada [24]. Habían nacido así las mezclas tibias, tal y como las conocemos actualmente.

Para el año 2000, la expansión acerca del conocimiento de estas mezclas empieza a hacerse patente. Así pues, empiezan a producirse presentaciones y conferencias alrededor del mundo. Éste es el caso de Harrison y Christodulaki en la First International Conference of Áspala Pavements (FICAP) en Sydney, Australia [21]. Este mismo año, aparece un documento del autor Koenders y su equipo. En éste evaluaban el rendimiento de las mezclas tibias (MAT) mediante el ensayo de mezclas en laboratorio y en campo (en Noruega, Reino Unido y Holanda) con referencia particular a la producción de mezclas densas en capas de rodadura [25]. De la mano de este mismo investigador aparece en 2002 un nuevo método de mezclas tibias, conocido bajo el nombre de WAMFoam, que produce mezclas asfálticas a menores temperaturas.

En 2004, Barthel, Von Devivere *et al* [3] hacen uso de zeolitas sintéticas, recogidas bajo el nombre comercial Aspha - Min®, como aditivo en las mezclas asfálticas de cara a mejorar la trabajabilidad de las mismas a temperaturas más bajas. Como se comprueba a partir de lo anterior, el desarrollo de los inicios de esta tecnología se produce principalmente en Europa y Australia, no siendo hasta Junio de 2005 cuando aparecen los primeros documentos en EE.UU. de la mano del National Center for Áspala Technology (NCAT), que publicó dos artículos acerca de investigaciones realizadas con dos productos pertenecientes a la gama de las MAT : Sasobit® y Aspha - Min® [26,27].

2.4.2 Principio de funcionamiento

Las tecnologías de mezcla asfáltica tibia utilizan diversos métodos, aditivos o adiciones para cumplir con el objetivo de producir una mezcla a más baja temperatura que las tradicionales en caliente. Pero aunque el objetivo de todas estas tecnologías sea el mismo, cada uno de los productos tiene sus características particulares. Aún así, diferentes rasgos comunes pueden ser identificados entre algunos de ellos, lo que nos permite establecer una clasificación más detallada en función del principio de funcionamiento en el que se basan [1,4,14,12,28,29]. En la Figura 2.4 se muestra un esquema de las distintas tecnologías de mezclas asfálticas tibias que actualmente existen.

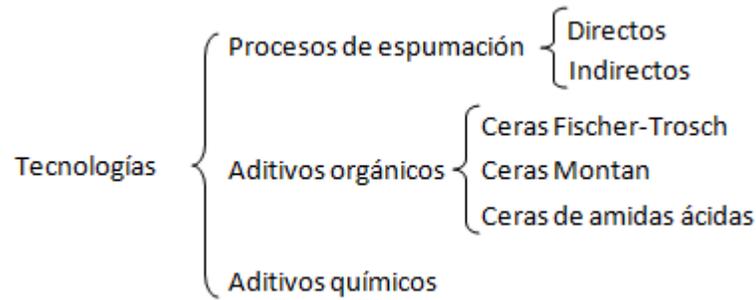


Figura 2.4 - Esquema de las distintas tecnologías de mezclas asfálticas tibias.
Fuente Galáz, 2011 [6].

Las tecnologías que utilizan procesos de espumación directos, agrupan a aquellos productos que usan agua de un modo directo. Es decir, el agua que se necesita para crear el efecto de espumación es inyectada directamente al flujo de asfalto caliente, realizándose en la mayoría de los casos a través de boquillas. El agua añadida rápidamente se evapora, produciendo un largo volumen de vapor, el cual lentamente va desapareciendo [14].

Los procesos de espumación Indirectos son aquellos que se basan en el uso de zeolitas sintéticas para conseguir el proceso de espumación. Dado que la presente investigación se ubica dentro de los procesos de espumación indirectos, se procederá a explicar con mayor detenimiento el principio de funcionamiento en el que se basa dicho proceso en las secciones 2.4.2.1 y 2.4.3.1

En cuanto a los aditivos orgánicos, estas tecnologías se basan en la adición a la mezcla de distintos tipos de cera. Por encima del punto de fusión de las ceras, se produce generalmente un decrecimiento en la viscosidad [1]. Durante el periodo de enfriamiento de la mezcla extendida los aditivos fundidos solidifican en partículas microscópicas y uniformemente distribuidas que incrementan la dureza del ligante, análogo a los materiales reforzados con fibras [30]. Los aditivos orgánicos suelen conseguir una reducción de temperatura de entre 20-30°C, mientras que también mejoran la resistencia a deformación de los asfaltos tratados con estos productos [4].

Finalmente, los aditivos químicos corresponden a productos que no dependen de ningún proceso de espumación o de reducción de la viscosidad para reducir las temperaturas de mezclado y compactación [4,31]. En lugar de eso, estos productos generalmente incluyen una combinación de agente emulsificantes, surfactantes, polímeros y aditivos para mejorar el recubrimiento de los áridos, la trabajabilidad de la mezcla, y la compactación, así como promotores de adhesión (agentes cohesivos).

Son numerosos los productos que se han desarrollado durante los últimos años en el campo que se refiere a las mezclas tibias. Está claro que todas estas tecnologías persiguen el mismo objetivo: disminución de la temperatura de fabricación, extendido y compactación de las mezclas asfálticas. Sin embargo, a partir de ideas originales y realizando diversas modificaciones, se han obtenido diversos productos comerciales que utilizan alguna de las técnicas antes mencionadas.

2.4.2.1 Procesos de espumación

El principio de funcionamiento de este tipo de tecnología MAT se basa a groso modo en el uso de pequeñas cantidades de agua, ya sea inyectadas directamente en el asfalto caliente o bien añadidas con los áridos al tambor de mezclado [1]. Cuando el agua se mezcla o entra en contacto con el asfalto caliente, las altas temperaturas de éste provocan su evaporación, y el vapor queda atrapado dentro de la matriz del asfalto. De este modo, se genera un volumen considerable de vapor, que se encarga de incrementar de manera temporal el volumen del asfalto y mejorar la trabajabilidad de la mezcla [28]. Este efecto dota a la mezcla de una mejora notable en lo que a recubrimiento de los áridos y trabajabilidad de la mezcla se refiere. Una característica común a los distintos procesos de espumación es lo limitado del efecto, de modo que la colocación y compactado de este tipo de mezclas debería ser llevado a cabo poco después de su producción [30]. Estos métodos se han usado con asfaltos de muy diferentes penetraciones, obteniéndose diversos resultados. Precauciones

especiales tienen que tomarse para que la cantidad adicionada de agua sea la correcta, es decir, se debe añadir suficiente agua para asegurar el efecto de espumación, pero no demasiada de modo que se evite problemas de cohesión que se pudieran crear por la incorrecta evaporación de toda el agua [32].

Aunque el proceso principal es el mismo para un gran número de productos que usan este principio, el modo en el que el agua es añadida a la mezcla puede variar, por lo que nos concentraremos en el modo relativo a la incorporación de zeolitas, el método indirecto.

a) Método indirecto

Este grupo se basa en el uso de zeolitas sintéticas para conseguir el proceso de espumación. Este material está compuesto de aluminosilicatos de metales alcalinos, y ha sido hidrotérmicamente cristalizado. Contienen aproximadamente un 20% de agua de cristalización, la cual se libera de la estructura de la zeolita ante el aumento de temperatura provocado por la adición del asfalto, causando un efecto de micro-espumado en la mezcla asfáltica [27,28,33,31,34]. La estructura de las zeolitas está formada por vacantes relativamente grandes respecto su tamaño, donde cationes e incluso moléculas o grupos de moléculas (en este caso agua) pueden ser almacenados. La habilidad de este material de poder adsorber y perder agua sin dañar su estructura cristalina es una de las principales características de estos silicatos [31,34].

2.4.3 Análisis de los productos comerciales que utilizan zeolita sintética

Dado que la presente investigación se enmarca en el uso de zeolita natural chilena en mezclas asfálticas como el agente promotor del proceso de espumación, es pertinente referirnos de manera particular a los dos productos comerciales que actualmente utilizan un principio similar, como son Aspha - Min y Advera. Estos productos comerciales, de uso extendido en Europa y Estados Unidos, utilizan el proceso de espumación con zeolita sintética por método indirecto.

2.4.3.1 Procesos de espumación con zeolita sintética

a) Aspha - Min®

Aspha - min® es una zeolita sintética producida por la empresa alemana Eurovia GmbH. Las zeolitas sintéticas son silicatos sódico - aluminicos que han sido hidrotérmicamente cristalizados. Contienen alrededor de un 21% de agua por peso. Se presenta comercialmente como unos gránulos muy finos, con un tamaño medio de partícula de alrededor de 380 μm o bien como un polvo fino, con 3.5 μm de tamaño medio. En el rango de temperaturas que va desde los 85 hasta los 180°C, el agua cristalina que contienen las partículas es liberada, creando el ya conocido efecto de espumación correspondiente, e incrementando la trabajabilidad de la mezcla. Eurovia recomienda añadir Aspha - min® en una dosis del 0.3% respecto al peso de la mezcla, lo que permite conseguir reducciones del orden de los 30°C en la producción y colocación de las mezclas [34].

Cuando se añade Aspha - min® a la mezcla al mismo tiempo que el ligante, el agua que contiene es liberada lo que crea una expansión de volumen del ligante que da lugar a la espumación de la mezcla y permite un mejor recubrimiento de los áridos y mayor trabajabilidad, todo ello a menores temperaturas de las habituales [26]. Eurovia asegura que todos los asfaltos conocidos, los modificados con polímeros así como el asfalto reciclado pueden ser usados junto con la implementación de esta tecnología. Además de esto, también todo tipo de áridos y *fillers* han sido probados para estas mezclas y no se producen, por lo tanto, modificaciones en el normal diseño de la mezcla. La adición de la zeolita en el proceso de mezclado no tiene por qué ser realizada a través de dispositivos especiales, pudiéndose realizar mediante un proceso similar a aquél usado para añadir ciertos tipos de fibras, y no alarga la duración del mismo [3]. En el caso de que deba añadirse al *filler*, el mezclado a mano también está contemplado [21].

A partir de la consulta de la web del producto, diversas recomendaciones son comentadas. Se aconseja el almacenaje entre -15°C y 70°C , ya que en ese rango no se produce ninguna modificación. Se aconseja evitar la humedad, y no existe ningún peligro de intoxicación por humos. Atendiendo a la legislación vigente en Europa, no se considera Aspha - min como un producto peligroso, y por lo tanto no se encuentra etiquetado en este sentido [34]. A partir de estudios llevados a cabo, se ha determinado que la disminución en la temperatura conseguida por Aspha - min® lleva claramente a un marcado menor consumo de energía.

Esto último influye además en las emisiones de CO_2 a la atmósfera, dando lugar de este modo a una mejora medioambiental [12].

Más de 100 proyectos se han realizado mediante el uso de esta tecnología desde 1995, según informa el fabricante.

b) Advera®

Este producto es comercializado por la compañía estadounidense PQ Corporation. Se trata de una zeolita sintética, al igual que Aspha - Min®, que consigue la producción y colocación de mezclas a temperaturas tibias de entre 20 a 35°C menores que las mezclas calientes. A través de dicha reducción, este producto permite la obtención de todas las ventajas o beneficios mencionados para las mezclas tibias: emisiones reducidas, consumo energético menor, mejor trabajabilidad, posibilidad de incrementar la cantidad de asfalto reciclado, etc. [35].

El proceso en el que se basa es exactamente el mismo que el anterior. Son aluminosilicatos hidratados, que contienen entre un 18 y un 21% de agua cristalizada. El tamaño y la calidad del producto cumplen con los estándares necesarios para conseguir la consistencia adecuada. Además, se trata de un producto no dañino para trabajadores y medio ambiente [7].

Esta tecnología ha sido usada con éxito en todos los tipos de mezclas asfálticas, incluyendo aquellas modificadas con polímeros, e incluso con caucho. Añadida con una dosificación del 0.25% respecto al peso de la mezcla, es fácil de manejar y ofrece beneficios en capas de base, rodadura y emulsiones asfálticas. Mediante los estudios realizados en laboratorio, su efectividad ha quedado patente.

2.4.4 La Zeolita

Como ya se ha visto en la sección anterior, la zeolita es un material que resulta fundamental en la producción de un determinado tipo de mezclas tibias; las que se basan en el método indirecto de los procesos de espumación. Su conocimiento se remonta a mediados del siglo XVIII, pero sin embargo no fue hasta la década de 1950 cuando realmente empezaron a verse las grandes ventajas que podría tener este producto que se extrae de manera natural de distintos yacimientos, entre ellos algunos chilenos. Sin embargo, también es posible su fabricación sintética, y es en esta forma de la zeolita en la que se basan los productos comerciales que hemos comentado anteriormente: Aspha - min y Advera.

Dada su importancia, en esta sección se va a tratar de profundizar tanto en la composición y estructura de este material, muy importantes para su posterior comportamiento, como en su modo de actuar y en sus propiedades.

2.4.4.1 Definición, composición y estructura

Se define la zeolita como aluminosilicatos hidratados y cristalinos compuestos de elementos del grupo I y II, en particular sodio, potasio, magnesio, calcio, estroncio y bario. Estructuralmente las zeolitas son sistemas de aluminosilicatos que se basan en infinitésimas redes tridimensionales de tetraedros de AlO_4 y SiO_4 , unidos unos a otros mediante los oxígenos que comparten [25]. De manera general, la zeolita se recoge bajo la siguiente fórmula científica: $\text{M}_{2/n}\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$

En la anterior fórmula de óxido, x es generalmente igual o mayor que 2 dado que los tetraedros AlO_4 están unidos a los tetraedros SiO_4 , n es la valencia del catión. La estructura contiene

canales y huecos interconectados que se ocupan por los cationes y las moléculas de agua. Los cationes tienen una movilidad alta y generalmente pueden intercambiarse con otros cationes. El agua intracristalina de la zeolita en muchos casos es expulsada continuamente y al contrario, adsorbida [36].

Es por lo tanto evidente que dentro de la estructura porosa de la zeolita, puede existir agua "almacenada". Entre las moléculas polares de agua y el sistema de entramado de la zeolita fuerzas dipolares actúan de un lado. Por otro lado moléculas de agua situadas alrededor en lugares cristalográficos actúan como disolvente de los cationes de la extraestructura (estructura exterior de la zeolita formada por cationes tales como Li^+ , Na^+ , K^+ entre otros), que dependen de la distribución de cargas del entramado causado para la distribución Si,Al junto con la distribución de cargas en el sistema de huecos. La desorción del agua zeolítica depende del tiempo y de la temperatura [37]. Esta transferencia está limitada por el diámetro de los poros de la zeolita, ya que sólo podrán ingresar o salir del espacio intracristalino aquellas moléculas cuyas dimensiones sean inferiores a un cierto valor, el cual varía de una zeolita a otra [38].

También en ciertos tipos de zeolita sintética, los cationes de aluminio pueden ser sustituidos por iones de galio o los de silicio por iones de germanio o fósforo. Para poder ser usada como cedazo (de manera que contenga agua para después ser liberada), la estructura de la zeolita después de deshidratarse completamente debe permanecer intacta.

La zeolita natural se forma a partir de roca volcánica y capas de cenizas que reaccionan al entrar en contacto con el agua alcalina. También cristaliza en ambientes post - deposicionales en periodos que van desde los miles hasta los millones de años en cuencas marinas profundas.

Cuando se forman de manera natural, las zeolitas rara vez son puras y suelen estar contaminadas por distintos minerales, metales, cuarzo y otras zeolitas. Por esta razón, la zeolita natural está generalmente excluida de muchas aplicaciones comerciales, donde la uniformidad y la pureza son esenciales. No obstante, el uso de zeolitas naturales es un campo que requiere de investigación dado que el valor económico de las zeolitas naturales es considerablemente menor que el de las zeolitas sintéticas [6].

2.4.4.2 Propiedades

a) Adsorción

Las zeolitas cristalinas son minerales adsorbentes gracias a los grandes canales centrales de entrada y a sus cavidades que se llenan de moléculas de agua formando esferas de hidratación. Si las moléculas tienen diámetros seccionales suficientemente pequeños para pasar a través de los canales de entrada, entonces, estas son fácilmente adsorbidas en los canales deshidratados y cavidades centrales. Las moléculas que no logran pasar por las cavidades centrales son excluidas, dando origen a la propiedad de tamiz molecular de las zeolitas [38].

b) Intercambio iónico

Se puede describir como la sustitución de los iones sodio de las zeolitas por cationes de otros tamaños y otra carga. Esta es una de las características esenciales de las zeolitas, y es así como se consigue modificar las propiedades para ajustar una zeolita a diversos usos [38]. El intercambio de iones en una zeolita depende de:

- Naturaleza de los cationes: tamaño, carga iónica, forma.
- La temperatura.
- La concentración de los cationes en solución.
- Aniones asociados con los cationes en solución.
- El solvente.
- Las características estructurales de la zeolita en particular.

c) Deshidratación - Rehidratación

Basado en el comportamiento de deshidratación, las zeolitas pueden ser clasificadas como:

- Aquellas que no muestran mayores cambios estructurales durante la deshidratación y exhiben una continua pérdida de peso como una función de la temperatura. Un ejemplo típico son las zeolitas naturales como: la clinoptilolita, la mordenita, la erionita, la chabazita y zeolitas sintéticas y naturales.
- Aquellas que sufren mayores cambios estructurales, incluyendo colapsos (derrumbes) durante la deshidratación, y exhiben discontinuidades en la pérdida de peso.

2.4.4.3 Zeolitas en Chile

En Chile históricamente ha existido un reducido desarrollo del conocimiento de zeolitas, pero en los últimos años han incrementado las investigaciones en tomo a este mineral, descubriéndose a lo largo de nuestro país una gran cantidad de yacimientos.

Existen diferentes empresas que manufacturan zeolita natural mezclada con subproductos que potencian los efectos a los cuales se enfoca su uso.

Su utilización en el ambiente nacional se relaciona principalmente con la producción de suplementos no nutritivos en alimentación animal [39]. No obstante, se pueden distinguir otros usos a menor escala en las siguientes áreas:

- Acuicultura: Como filtración de amonio n pisciculturas.
- Agricultura: Como retenedor de agua en sistemas de riegos, retenedor de nutrientes para ser entregados lentamente a través del tiempo, como reductor de las pérdidas de nitrógeno.
- Nutrición animal: Como mejorador de la eficiencia alimenticia.
- Tratamiento de aguas servidas: Como removedor de amonio, fósforo y metales pesados, tratamiento de lodos.
- Industria: Como adsorbente de aceites en detergentes.

2.4.5 Especificaciones técnicas

A lo largo de esta sección se mostrará de manera general aquellos aspectos técnicos que sufren algún tipo de modificación con respecto a las mezclas convencionales calientes como consecuencia de la introducción de alguna de las tecnologías de mezclas asfálticas tibias (cualquiera que sea). Aunque es un tema difícil ya que cada país tiene normativa o métodos de evaluación diferentes, sí es cierto que hay puntos comunes en todas las mezclas. Será sobre estos temas en que se hará énfasis.

2.4.5.1 Diseño de la mezcla

Dependiendo de la situación geográfica, los métodos de diseño de la mezcla usados para determinar los parámetros de una mezcla convencional difieren. En Chile el método de diseño que indica la normativa para mezclas en caliente es el Método Marshall, en EE.UU. el diseño SUPERPAVE está ampliamente implementado y en Europa el más común es el método Marshall. Ambos métodos han sido usados para tests usando diferentes tecnologías tibias. Además de eso, los procesos de mezclas tibias también se han probado con diferentes tipos de mezclas asfálticas

(densas, Stone Mastic, porosas, etc.). De todas estas pruebas y ensayos, la principal conclusión es que, de manera general, se puede afirmar que no existen restricciones a la hora de usar métodos tradicionales de diseño de mezclas para las tecnologías tibias [3]. Sin embargo, en la mayoría de la literatura consultada [1,31,40], se establece que pequeñas variaciones deberían ser introducidas o tenidas en cuenta. Algunos de los elementos específicos del proceso de diseño van a ser discutidos a continuación.

a) Granulometría de los áridos

La selección de los áridos en cada una de las mezclas realizadas en la bibliografía consultada se realizó siguiendo las recomendaciones tradicionales establecidas para las mezclas convencionales. Se puede decir que se han realizado todo tipo de asfaltos utilizando las tecnologías tibias [31], y en todos los casos, el proceso para realizar los ensayos fue el mismo [27,7]. Por lo tanto, mismas granulometrías fueron usadas tanto para las mezclas calientes como para las tibias, de modo que posteriormente ambos resultados pudieran ser comparados [25]. Como resultados se obtuvo que no existen diferencias notables en la selección de granulometrías para las mezclas tibias.

b) Aditivos

Considerando algunas de las tecnologías que hemos visto como aditivos a las mezclas convencionales, la dosificación de cada una se debe elegir siguiendo en todo momento las recomendaciones del fabricante, las cuales pueden variar de unos productos a otros [1].

En los casos en los que las mezclas calientes llevasen aditivos adicionales, las correspondientes tibias deberían también llevarlas [14]. Sin embargo, en los procesos de espumación, debido a la posible pérdida de adhesión y recubrimiento entre el ligante y los áridos, deberían añadirse agentes promotores de la cohesión. La elección de un tipo de agente en concreto debe hacerse con vistas al hecho de que las menores temperaturas usadas en las MAT pueden llevar a la pérdida de efectividad del efecto promotor del producto.

c) Ensayos de Laboratorio

La mayoría de los laboratorios que han trabajado con mezclas calientes están familiarizados con los procesos a seguir a la hora de analizar las mezclas asfálticas, y cómo interpretar los resultados que se obtienen a partir de ellos. Por este motivo, los análisis rutinarios de las mezclas tibias deberían incluir aquellos usados en el análisis rutinario de las mezclas en caliente y en las mismas condiciones de análisis. De manera similar, un análisis completo de MAT debería incluir aquellos tests que de forma usual se realizan a los especímenes de las mezclas calientes. En la mayoría de los casos, los ensayos de laboratorio realizados sobre mezclas de campo se correspondieron con la tendencia vista en las investigaciones de laboratorio [31].

La información anteriormente comentada puede usarse para el caso de las tecnologías basadas en aditivos químicos u orgánicos. Sin embargo, en los productos basados en procesos de espumación el ensayo en laboratorio no es tan simple. En el caso de las tecnologías del método indirecto, se debe prestar especial atención de modo que se puedan reproducir las condiciones adecuadas de la manera más cercana posible [1].

Según Chowdhury [31] y Hurley *et al* [26], aunque se deben aplicar los mismos estándares tanto a las MAT como a las MAC, se deben establecer métodos adecuados de curado en los ejemplares de las mezclas tibias que inicialmente incorporen agua. Sin embargo esta idea ha sido rechazada por posteriores investigadores.

d) Temperaturas de producción y compactación

Como se ha hablado anteriormente para el caso de otros parámetros, las temperaturas de producción y compactación de las mezclas tibias depende de manera primordial de la tecnología usada para su fabricación. Las temperaturas óptimas o las ventanas en las que éstas se producen se determinan con objeto de conseguir un recubrimiento completo de los áridos y una correcta

trabajabilidad en el espacio de tiempo necesario. Aunque existen maneras teóricas de averiguar dichos rangos, puede que éstas no sean de aplicación para las mezclas tibias. En estos casos, la evaluación directa de qué temperaturas utilizar puede hacerse mediante un enfoque directo [28]. Así pues, las temperaturas más adecuadas de producción y compactación pueden determinarse comparando la densidad aparente de la MAT en cuestión con la mezcla de referencia convencional. De este modo la temperatura a la que ambas densidades son iguales puede establecerse de manera clara.

Este proceso se encuentra descrito por la Asociación de Pavimentos Asfálticos alemana (German Áspala Pavement Association) [28], que lo determina como sigue: *“La composición óptima de la mezcla asfáltica y la densidad de referencia a las temperaturas de compactación de 135°C y 145°C se determinan llevando a cabo un ensayo de referencia sin el aditivo MAT. Se deben fabricar muestras de mezclas tibias con productos MAT a diferentes temperaturas de compactación (ej: 110, 120, 130, 140 y 150°C) de manera que podamos determinar la temperatura adecuada de producción de la mezcla”.*

Por su parte, la normativa chilena vigente indica que las temperaturas de mezclado y compactación para las mezclas asfálticas en caliente serán aquellas en donde el asfalto utilizado presente viscosidades dentro de los rangos establecidos por el Manual de Carreteras (MC-V.8 8.302.40 y 8.303.42) para mezclar y compactar la mezcla asfáltica, a saber, 170 ± 20 y 280 ± 30 cSt., respectivamente.

e) Selección del asfalto

Aunque el menor envejecimiento del ligante puede considerarse como una ventaja de las mezclas tibias (dado que puede traducirse en una mayor vida útil del pavimento), también puede convertirse en un impacto negativo, ya que puede llevar a deformaciones permanentes en las etapas iniciales de uso. Por esta razón, pudiera ser necesario elegir una dureza o grado de asfalto diferente [1]. Ha habido algunas investigaciones en torno a este respecto llevados a cabo en el estado de Montana, EE.UU., que han dado lugar a una serie de recomendaciones publicadas por parte del departamento de transporte. Sin embargo, debido a las diferencias en los métodos de diseño entre los países europeos y EE.UU., de modo general estas recomendaciones no pueden seguirse [1]. A pesar de ello, no se debería de manera arbitraria usar un ligante para las mezclas tibias de distinta gradación que el usado para las mezclas convencionales. Es más, Romier et al. (2006) estableció que en las mezclas usando el método Low Energy Áspala incorporaban el mismo ligante que las mezclas asfálticas en caliente, en la misma proporción y con la misma dureza, lo cual es de modo general cierto para otros productos de este tipo de mezclas [31].

f) Contenido de asfalto

El centro nacional para tecnologías asfálticas de los EE.UU. (NCAT) ha llevado a cabo gran cantidad de ensayos en torno a mezclas asfálticas en lo que a EE.UU. se refiere, y establece que el contenido óptimo de asfalto puede determinarse mediante el proceso estándar usado para las mezclas convencionales sin que se añada el aditivo de mezcla tibia. Sin embargo, existen preocupaciones expresadas por otros autores, dado el hecho de que, debido a la mejor compactabilidad conseguida a la hora de aplicar estas mezclas, se podría llevar a cabo una disminución de medio punto porcentual en el contenido óptimo de asfalto para las mezclas MAT con respecto a las convencionales. Estas preocupaciones pueden resumirse en dos:

- Dada la menor temperatura de mezclado de las mezclas tibias, se produce una menor absorción de ligante por parte de los áridos [31], lo cual hace indicar que se necesita menor cantidad de asfalto..
- Ya que se produce una mejora de la compactabilidad en comparación con las mezclas convencionales, existe un menor número de huecos en la mezcla tibia, lo que hace indicar que el contenido óptimo de asfalto en la mezcla debe ser menor [31].

Sin embargo, reducir el contenido óptimo de asfalto puede llevar a eliminar la mejor compactación resultante de la adición de estas tecnologías [26].

2.4.5.2 Ensayo de tracción indirecta (ITS)

La resistencia a tracción indirecta es un parámetro que se utiliza para evaluar la susceptibilidad al humedecimiento de las mezclas asfálticas. Para ello se mide la resistencia a la tracción antes y después de saturar la probeta, y luego se calcula la resistencia a la tracción retenida como un porcentaje de la resistencia a la tracción original.

La sensibilidad a la humedad mostrada por las mezclas tibias y en especial por aquellas que utilizan procesos de espumación, puede convertirse en un problema a considerar. Por lo anterior, el uso de criterios de diseño que incluyan la tracción Indirecta de la mezcla, ofrecerían un método de diseño más confiable. [41]

Este ensayo reproduce el estado de tensiones de la fibra inferior de la capa asfáltica o zona de tracción. Es un método práctico y sencillo para caracterizar las propiedades de las mezclas asfálticas o evaluar el fallo provocado por tensiones de tracción.

En la Figura 2.5 se muestra un esquema propuesto por Roque y Buttlar [42] en donde se muestra el estado de tensiones provocado por una carga simple en la estructura de un pavimento, donde se distinguen cuatro casos:

Caso 1: Compresión triaxial en la superficie inmediata bajo la rueda.

Caso 2: Tracción longitudinal y transversal combinada con compresión vertical en la parte inferior de la capa asfáltica bajo la rueda.

Caso 3: Tracción longitudinal o transversal en la superficie a una cierta distancia de la carga.

Caso 4: Compresión longitudinal o transversal en el fondo de la capa asfáltica a una cierta distancia de carga.

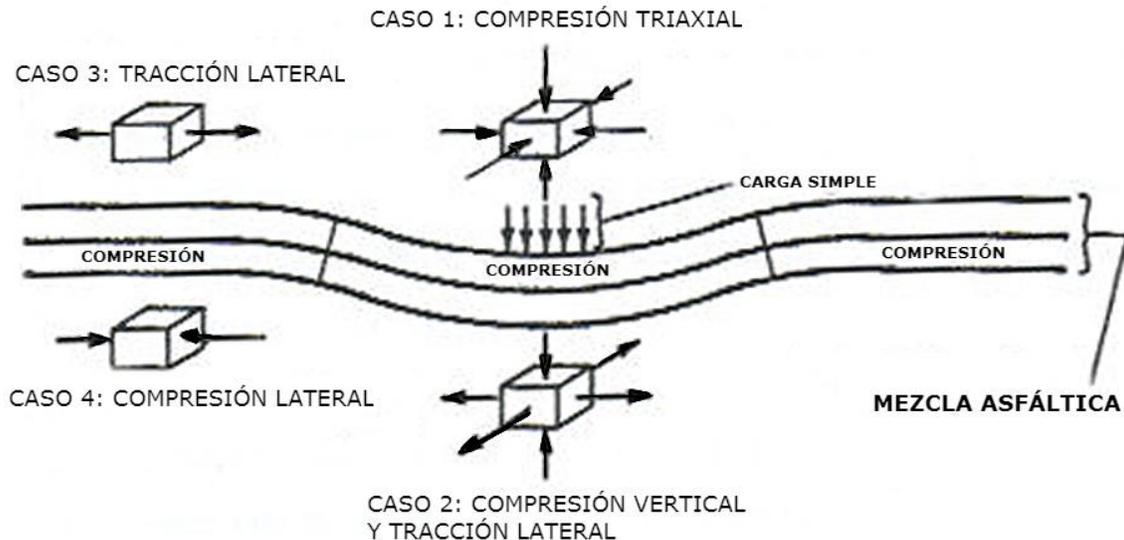


Figura 2.5 – Esquema del estado de tensiones de un pavimento asfáltico bajo una carga simple.

Fuente: Aschenbrener, 2011 [43].

Si bien es cierto los cuatro estados tensionales son de importancia, hay uno que tiene tensiones críticas y éste se produce en la fibra inferior de la capa asfáltica bajo la carga aplicada (caso 2). El ensayo de tracción indirecta por compresión diametral reproduce el estado de tensión crítica

para la mezcla asfáltica, bajo las condiciones de carga de servicio, en la fibra inferior de la capa asfáltica o zona de tracción [43].

Como la respuesta del material es altamente dependiente de la temperatura, el ensayo de tracción indirecta tiene validez para materiales de comportamiento fundamentalmente elástico y lineal. La norma indica el uso de una temperatura de 25 °C. Si la temperatura del ensayo fuera mayor a la indicada el material se comportaría de manera no lineal ya que comenzaría a ablandarse lo que generaría mediciones desiguales.

Este ensayo también es utilizado para medir la deformación por tracción en falla que a su vez se relaciona con el potencial de agrietamiento de la mezcla. Las mezclas que toleran altas deformaciones antes de alcanzar la falla resisten mejor los agrietamientos comparadas con las mezclas que no toleran altas deformaciones [43]. Además, el ensayo de tracción indirecta también se puede relacionar con propiedades elásticas resilientes (módulo de elasticidad estático o dinámico en función del tipo de carga aplicada), fisuración térmica, fisuración por fatiga, deformación permanente.

a) Descripción del ensayo ITS

Este ensayo consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, igual a la definida en el ensayo Marshall, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura (Figura 3).

Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral [44].

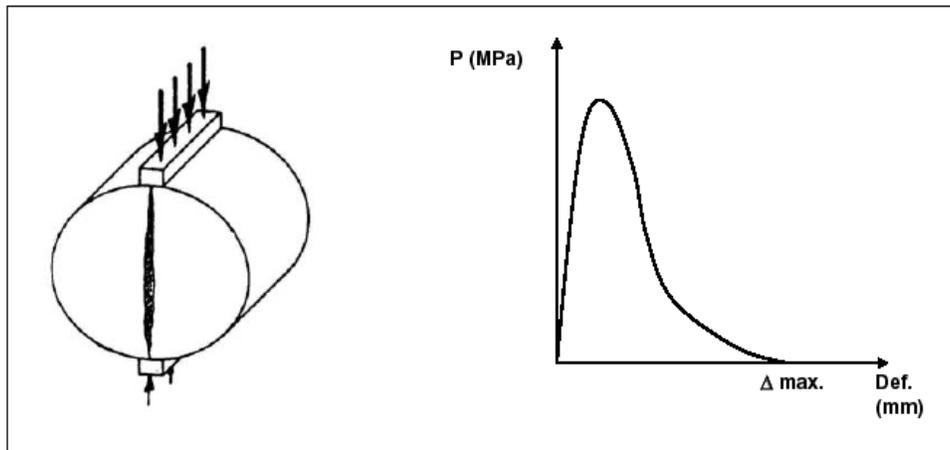


Figura 2.6 – Configuración del ensayo y respuesta de la probeta.
Fuente [35].

La probeta es cargada a compresión según un plano diametral vertical de la misma (Ver Figura 2.6). Para poder cargar la probeta a compresión en un plano diametral vertical, se requiere un dispositivo de sujeción de la probeta a través del cual se materialice dicho plano de carga. Como parte de este dispositivo, y en contacto directo con dos generatrices diametralmente opuestas de la probeta, existen dos elementos encargados de evitar la rotura local de la probeta durante el ensayo. Se utilizan unas placas de apoyo curvo, con radio de curvatura igual al radio nominal de la probeta, de 12,7 o 25,4 mm. de ancho, para que la distribución de tensiones no se altere.

Por la norma la velocidad de desplazamiento del sistema durante la carga será uniforme e igual a 50,8 mm/min., igual a la empleada por la prensa en el ensayo Marshall.

Como la respuesta del material es altamente dependiente de la temperatura, ésta será una variable más para el ensayo. El ensayo de tracción indirecta tiene validez para materiales de comportamiento fundamentalmente elástico y lineal. La norma indica el uso de una temperatura de 25±1 °C, pero permite el uso de otras temperaturas para analizar la susceptibilidad térmica de la

mezcla en estudio y sugiere que no se utilicen temperaturas superiores al punto de reblandecimiento del ligante por ser predominante el carácter viscoso de las mezclas.

La principal ventaja del método es la sencillez de su metodología. Este es un factor muy valorado por todas aquellas instituciones que necesitan caracterizar de una forma rápida, fiable y económica los pavimentos que gestionan. El Departamento de carreteras del Estado de Texas impulsó unos estudios dirigidos por Tomas Kennedy [45] de la Universidad de Austin en los cuales presentó las principales ventajas del ensayo:

- Es un ensayo relativamente sencillo.
- Presenta similitud con otro tipo de ensayos como el Marshall.
- El tipo de muestra y el equipo son los mismos que los utilizados para otro tipo de ensayos.
- La rotura no se ve afectada por las condiciones de la superficie de la probeta.
- La rotura se inicia en una región relativamente uniforme de tensiones de tracción.
- El coeficiente de variación de los resultados del ensayo es relativamente bajo comparado con otros métodos. Tesoriere [26] en sus estudios habla de dispersiones inferiores al 10% en comparación con el de Marshall que pueden ser del 15-20%.
- El ensayo puede utilizarse bajo carga estática o dinámica, modificando la prensa en función del tipo de estudio que se realice.

b) Situación actual del ensayo ITS

Si consideramos que el ensayo de tracción indirecta simula el estado de tensión en la posición más baja de la capa de mezclas asfálticas, esto lo convierte en una herramienta interesante para utilizarla como un ensayo clave en el estudio de las mezclas asfálticas. Con el valor añadido que es un ensayo simple y práctico y los resultados de la prueba no se ven afectados por las condiciones superficiales de la probeta. Así mismo, la rotura se produce en una zona de tensiones constante, lo que implica una baja dispersión en los resultados.

Un estudio [44] demostró que el módulo a temperaturas inferiores a 30 °C suponiendo un comportamiento elástico de la capa, calculado utilizando una galga extensométrica en la zona de tensiones constante mediante el ensayo de tracción indirecta, da una excelente predicción de la tensión y la deflexión del pavimento en servicio. Este hecho demuestra que el valor del módulo obtenido con el ensayo de tracción indirecta es un buen estimador del módulo de la capa del pavimento.

El hecho de trabajar en laboratorio tiene el inconveniente de que las probetas fabricadas no son totalmente representativas de la capa de la carretera. Para investigar la representatividad del ensayo sobre testigos extraídos *in situ*, en [46] se dirigió un estudio con 20 testigos extraídos de 13 secciones de carreteras de nueva construcción. Los ensayos consistían en determinar el espesor de la capa, el porcentaje de huecos, la granulometría de la muestra, el tipo y porcentaje de asfalto, el módulo de rigidez (resiliente) y la tensión de fatiga, mediante el ensayo de tracción indirecta. Algunas de las conclusiones que extrajo fueron las siguientes:

- Existen muchas variaciones en la composición de la mezcla de la capa base colocada en obra, lo que provoca variaciones importantes en las características de la mezcla (módulo de rigidez y fatiga).
- El ensayo de tracción indirecta es relativamente sencillo y rápido de realizar con probetas cilíndricas extraídas del pavimento, con pocas dispersiones en los resultados y muy apto para realizar controles rutinarios.

Por otro lado, en el trabajo de investigación realizado conjuntamente por la Universidad Carleton (Ottawa) y la Universidad Al-Azhar (El Cairo) [41], se demuestra que los criterios convencionales de diseño no proveen un indicador confiable para la selección de la mezcla más eficiente y que el uso de un criterio que incluya la Tracción Indirecta de la mezcla ofrecería un método de diseño más confiable. Basado en los resultados de ensayos de laboratorio se demuestra también que este ensayo detecta la influencia del tipo de asfalto en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas.

En Chile, la normativa vigente [16], especifica el ensayo de tracción indirecta solo para el diseño de mezclas recicladas y estabilizadas con asfalto espumado, que corresponde a una mezcla asfáltica fría y fabricada directamente en el sitio donde se dispondrá.

2.4.6 Propiedades, rendimiento y costos comparativos

A lo largo de esta sección se tratarán aquellos aspectos relacionados con las propiedades de las mezclas tibias, prestando especial atención a aquellos que influyen directamente en los costos de este tipo de mezclas. Desde el punto de vista práctico, está claro que el modo más fiable de evaluar el rendimiento de una mezcla asfáltica es mediante los tramos de prueba. En EE.UU. este tipo de tramos están ampliamente extendidos, pero sin embargo en Europa, donde esta tecnología es más antigua, sólo en Alemania y Noruega se usan este tipo de ensayos de manera generalizada. Por este motivo, la mayoría de los resultados con los que se cuentan actualmente provienen de estudios de laboratorio.

2.4.6.1 Rendimiento

En general, es posible afirmar que las secciones de carretera que hasta ahora se han construido usando tecnologías y productos MAT han exhibido hasta el momento un rendimiento igual, y en limitados casos superior, al de las mezclas convencionales [1,4,14,21,22,13,28]. Sin embargo estas secciones tienen un tiempo que no supera los 10 años en casi ningún caso (las primeras secciones de prueba fueron construidas a finales de los años 90 [4]), por lo que es más difícil establecer si realmente su rendimiento a largo plazo es superior o igual al de las mezclas convencionales. En caso de que no fuese así, todas las ventajas que pudiese conllevar el uso de estas mezclas quedarían contrarrestadas por su falta de aplicación práctica, ya que no tendría sentido hablar de ahorro energético o menor daño ambiental si tenemos que estar sustituyendo el pavimento con una mayor frecuencia que las mezclas convencionales. Chowdhury establece [31], desde su experiencia, que aquellas secciones asfálticas que fallan antes del fin de su vida útil generalmente muestran signos de agotamiento antes de los 5 años posteriores a su construcción.

A pesar de lo anterior, es necesario tener en cuenta el hecho de que el envejecimiento a largo plazo debe ser investigado más profundamente, lo que puede sacar a la luz mayores diferencias entre las mezclas convencionales y las tibias, así como incluso diferencias entre las mismas tecnologías MAT [6]. La importancia del factor de envejecimiento a largo plazo radica en el hecho de que, al realizar estas mezclas a menor temperatura, el envejecimiento que se produce en el asfalto es bastante menor, con la consiguiente ventaja de que la vida útil del asfalto puede verse ampliada [4].

Además de ese aspecto, también necesita una más profunda investigación diferentes aspectos expresados por algunos autores como preocupante. Tales aspectos viene a ser: sensibilidad al agua, aumento de las deformaciones permanentes, necesidad de tiempo de cura de algunos de estos productos [14]. También hay que prestar especial atención a problemas que pueden aparecer como consecuencia de la menor temperatura de fabricación de estas mezclas. Así pues, el secado incompleto de los áridos, el pobre recubrimiento de éstos por parte del asfalto o la permanencia de agua que lleve a menor adherencia son factores que pueden afectar al rendimiento de estas mezclas. Muchos de ellos han sido ya investigados, y al día de hoy se encuentran posibles soluciones a los mismos [8].

2.4.6.2 Propiedades

Para entender de mejor manera el funcionamiento de estas mezclas y cuáles son sus puntos débiles, se tratarán a continuación algunas de las propiedades que las caracterizan.

a) Compactación

A la hora de estudiar la compactación de una mezcla asfáltica en el laboratorio existen distintos métodos. En Europa, para las probetas cilíndricas, el más usado es el método Marshall,

aunque también existen otros como el compactador giratorio o el compactador vibratorio. Así mismo se afirma que el compactador Marshall o el vibratorio proveen resultados más fiables que simulan en mejor modo las condiciones de compactación a menores temperaturas.

En el caso de las mezclas tibias, de los resultados e investigaciones llevadas a cabo se extrae que tienen una mejor compactación potencial dado el hecho de que su viscosidad es menor y el asfalto se encuentra menos envejecido como resultado del proceso de producción. Debido al hecho de que se puede conseguir una mayor compactación por cada pasada de rodillo en obra, pudiera ser que el número de pasadas necesarias para alcanzar la densidad aparente necesaria fuera menor, lo que supondría un ahorro de energía en la compactación y un aumento del periodo de tiempo disponible para la compactación, lo cuál puede ser especialmente importante a bajas temperaturas. Los riesgos asociados a una compactación reducida superan con creces los costos adicionales de la producción de mezclas tibias.

A partir de resultados de campo obtenidos en Alemania [1], se puede afirmar que por encima de su punto de fusión, las tecnologías MAT basadas en ceras permiten una compactación con menor esfuerzo y realizada a una menor temperatura. Después de una pasada del rodillo, se consiguió un grado del 96% de compactación, y con dos pasadas casi la mayor densidad posible [1].

b) Curado

Las diferentes propiedades del asfalto, así como su distinta consistencia, de aquellos que se usan para la producción de mezclas tibias dan lugar a capacidad diferente de estas con respecto a las convencionales. Ya se ha visto anteriormente que la reducción de la viscosidad del asfalto a temperaturas de producción y compactación menores a las convencionales, puede resultar en importantes cambios de rigidez de la mezcla en el corto plazo principalmente. Esto se puede convertir en un factor importante para determinar que tan rápido se puede reabrir al tráfico en una carretera, de modo que las deformaciones no sean un problema inmediatamente después de su construcción.

La necesidad de un tiempo de curado puede ser también importante a la hora de evaluar estas mezclas en el laboratorio. Para aquellos productos que utilicen procesos de espumación para la producción de estas mezclas, es necesario permitir la disipación de la humedad antes de realizar los ensayos. El curado simularía de este modo el envejecimiento a corto plazo que se produce en el silo y en el transporte de estas mezclas. De este modo, mientras que para las mezclas convencionales no existen requisitos concernientes a un tiempo de curado, para la mayoría de MAT se aconseja al menos dos horas de curada a temperatura de compactación antes de los ensayos [1,31]. Por lo tanto, mientras que para las mezclas convencionales los resultados solo experimentaron cambios mínimos después del curado, el efecto en las mezclas tibias es bastante más obvio. Para evitar resultados imprecisos o engañosos, se recomienda someter a la mezclas a un periodo de curado corto antes de compactar los testigos de laboratorio [31,47]. Sin embargo, el modo de realizar este curado varía entre los distintos autores que recomiendan su uso. En [47] se aconseja realizar el curado de las mezclas tibias en un horno de corriente de aire a la temperatura de compactación durante dos horas, mientras que Chowdhury et al [31] establece que no existe necesidad de curado para Sasobit y Asphaltan B (aditivos orgánicos) basado en los ensayos realizados, pero sí para Evotherm (aditivo químico), WAM - Foam y Aspha - Min (procesos de espumado), donde el curado ayudaría a expulsar la humedad residual que queda en la mezcla.

La determinación de las propiedades de curado para estas mezclas tibias es altamente importante de modo que sea posible predecir el rendimiento de las mismas en servicio y el tiempo que debe pasar para permitir la reapertura al tráfico rodado, sin que aumente la posibilidad de aparición de deformaciones. En otras investigaciones [26,31] se establece que no hay necesidad de un mayor periodo de curado para permitir la apertura al tráfico en las MAT producidas con tecnologías Aspha - Min, Evotherm y Sasobit. Dado esta característica, una aplicación que se ha encontrado de Sasobit es su uso en pistas de aeropuertos. Así pues, en el aeropuerto de Frankfurt, tras su puesta en obra durante 7.5 horas durante la noche, se reabrió al tráfico aéreo a la temperatura de 85°C en la mañana [1].

c) Sensibilidad a la humedad

La sensibilidad a la humedad experimentada por las mezclas tibias puede convertirse en un problema muy importante. Si la humedad contenida en los agregados antes de mezclarlos con el asfalto no se evapora totalmente durante el mezclado debido a las menores temperaturas, el agua permanecerá retenida en los mismos lo que puede llevar a un incremento de la sensibilidad al daño por la misma. Esto es incluso más crítico para las tecnologías MAT que se producen usando procesos de espumación, debido a la humedad residual que pueden dejar atrás.

La normativa europea establece a través de la norma EN 12697-12 tres métodos para determinar la sensibilidad al agua. El más común es el índice de tracción indirecta, que se determina a partir de dos conjuntos iguales de probetas. Este ensayo mide la fuerza ejercida para la rotura, pero también el recubrimiento del árido y la fracturación de los mismos.

De este modo es posible determinar la mala adhesión asfalto-áridos (fallo por adhesión) debido a la humedad. Otro método utilizado para medir indirectamente el daño a sensibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas es el dispositivo Wheel Tracking de Hamburgo. Se trata de un test simulativo que permite determinar la resistencia del pavimento a deformaciones plásticas permanentes. De manera adicional, la sensibilidad al agua se mide como el punto de inflexión de la gráfica obtenida del ensayo. Corresponde al número de pasadas en la cual la deformación de la probeta es el resultado del daño por la humedad y no solo deformación plástica [1].

Una investigación importante llevada a cabo sobre este aspecto es la de Hurley and Prowell [8,12,32] en la que tratan principalmente con Aspha - Min, Sasobit y Evotherm. Para ello usaron el ensayo de tracción indirecta a diferentes temperaturas de compactación con áridos secados al horno. Los resultados que se obtuvieron mostraron que el uso de estos aditivos disminuía el índice de tracción indirecta en comparación con la mezcla de control convencional. Solo tres de las nueve probetas ensayadas cumplieron el requisito de la norma americana Superpave de 80% de resistencia conservada entre las muestras saturadas y las secas. Los peores resultados fueron siempre para Aspha - Min (tecnología basada en procesos de espumación por método indirecto), lo que se cree puede estar conectado con la espumación del asfalto a partir de la humedad liberada por la zeolita, causando fallo en la cohesividad. Posteriormente se midieron dichos índices con aditivos promotores de la adhesión en los productos pero no se presentaron los resultados esperados. En el caso de Aspha - Min, los resultados fueron incluso peores, lo que puede estar relacionado con la reducción de la viscosidad por parte del agente cohesivo.

De todo lo anterior se puede concluir que el ensayo de la Wheel Tracking de Hamburgo puede convertirse en uno particularmente importante para la evaluación de las mezclas tibias, dado su carácter simulativo que permite directamente determinar el rendimiento de la mezcla sin tener mucha experiencia en el rendimiento real *in situ*. El beneficio de este método es que permite la evaluación de las deformaciones y sensibilidad al agua. El método ha demostrado ser sensible a factores importantes para las MAT incluyendo la dureza del ligante, el envejecimiento a corto plazo, la temperatura de compactación y los tratamientos de adherencia.

Actualmente, el método principal para determinar la resistencia a deformaciones permanentes es el ensayo Wheel Tracking, que se realiza al aire.

d) Rigidez de la mezcla

La rigidez de un pavimento depende tanto de las propiedades del asfalto como del esqueleto mineral, donde el ligante es el responsable de las propiedades visco-elásticas mientras que el esqueleto influye en las propiedades plásticas y elásticas. La proporción en la que cada una de estas partes influye viene determinada por la duración de la carga y la temperatura a la cuál este se produce. En laboratorio, la rigidez de la mezcla se mide mediante distintos métodos, por ejemplo mediante el ensayo de flexión o carga en 4 puntos en probetas en forma de viga o ensayos uniaxiales y triaxiales en probetas cilíndricas.

Los componentes de la mezcla y su composición pueden ser extremadamente diversos, por lo que resulta bastante difícil predecir las propiedades de una mezcla particular. De cualquier modo, está claro que uno de los factores claves que influye en la rigidez final de la mezcla es la rigidez del asfalto.

Esto supone un problema importante dadas las diferencias entre las mezclas convencionales y las tibias, ya que como se ha visto anteriormente la rigidez de las MAT se ve afectada por las diferentes temperaturas de producción y mezclado y posiblemente, por cambios en el diseño de la mezcla.

Por lo tanto la predicción del módulo de rigidez podría ser una herramienta útil para diseñar las mezclas tibias con respecto a qué rigidez de asfalto elegir, prediciendo la rigidez del pavimento y los posibles problemas que puedan aparecer concernientes a deformaciones permanentes, y sugiriendo posible ajustes en el espesor de las capas. Existen numerosos métodos para predecir dicha rigidez de las mezclas y que pueden servir para determinar las diferencias entre las MAC y las MAT, y ayudar a diseñar la mezcla eligiendo el asfalto correcto.

Hurley and Prowell [26,27,32] han llevado a cabo experimentos acerca del módulo de rigidez residual para productos MAT (Sasobit, Aspha - min y Evotherm) en diferentes rangos de temperaturas y con dos tipos de árido diferentes. Concluyeron que el uso de estos aditivos no cambia significativamente el valor del módulo residual y que el diseño del espesor de la mezcla no debería verse afectado por el uso de tecnologías de mezclas tibias.

e) Deformaciones permanentes

Las deformaciones permanentes del pavimento (también conocidas como ahuellamientos) se forman durante la respuesta de baja rigidez del material, cuando la rigidez del asfalto es menor de 0,5 MPa [63]. Este comportamiento de rigidez viscosa ocurre en las mezclas asfálticas cuando las temperaturas son elevadas o cuando la aplicación de la carga se produce durante periodos largos y es mucho más complejo que el que se produce en la zona elástica. La rigidez en esta fase es función de múltiples parámetros, entre los que se encuentran: rigidez del asfalto, vacíos en el árido, tipo, forma, macrotextura, microtextura y estructura del árido, compactación (porcentaje de huecos, método de compactación, etc.) y condiciones de confinamientos.

Existen preocupaciones expresadas ampliamente por los investigadores acerca del rendimiento ante deformaciones plásticas de las mezclas tibias. Estas preocupaciones están conectadas principalmente con la menor temperatura de mezclado, que puede llevar a un secado incompleto de los áridos y a un recubrimiento deficiente de los mismos. Otro aspecto que puede influir en la disminución de esta resistencia es el menor envejecimiento del asfalto debido también a las menores temperaturas de producción y compactación. Visto esto, puede aumentar por tanto el potencial de deformaciones plásticas, lo que sugiere que tal vez deberían usarse asfaltos de grados más duros, como ya se ha comentado anteriormente. Para evaluar el impacto de estos problemas potenciales se han llevado a cabo investigaciones para determinar ensayos y test *in situ* que permitan vaticinar el comportamiento de las mezclas ante estas deformaciones.

La investigación de Hurley and Prowell [1,7,27] también evaluó este parámetro para Aspha - Min, usando el ensayo de tracción indirecta ya comentado. Los resultados mostraron que el potencial de deformación aumentaba con la disminución de la temperatura de mezclado y compactación para todos los productos, incluyendo la mezcla patrón. Por lo tanto la reducción de resistencia a deformación puede estar relacionada más con el menor envejecimiento del ligante que con una tecnología en particular.

2.4.6.3 Costos comparativos

Una vez vistas las propiedades que determinan el rendimiento de este tipo de mezclas, merece especial atención introducir una comparación entre los costos de producción que diferencian a las mezclas tibias de las convencionales en caliente. Está claro que estos costos englobaran numerosos factores, algunos de los cuales permanecerán inmutables para ambos tipos de mezclas. Nos centraremos principalmente en aquellos que representan una mayor diferencia.

Kristjansdottir *et al.* [21] señalaron que en algunas obras donde se midió el consumo energético, había generalmente una reducción de entre un 20% y un 75% en comparación con las mezclas convencionales, dependiendo de cuanto disminuía la temperatura de producción. Algo importante a tener en cuenta a la hora de hablar de los costos es que este beneficio energético depende indudablemente del tipo de energía y el costo de la misma. Así pues, si el costo energético es alto, el beneficio será mayor. Si la energía proviene de materiales pétreos o de la electricidad, se

requieren alrededor de 300.000 BTU para producir una tonelada de mezcla convencional, lo que equivale más o menos a 7,6 - 11,4 litros de gasolina o diesel o de 2,5 a 3,5 termias de gas natural [31].

Los contratistas generalmente perciben riesgos ante los procesos y tecnologías nuevos y, como resultado, aumentan los precios de contratación. Kristjansdottir et al. (2007) [21] sugiere que los riesgos asociados con las mezclas tibias pueden de manera general clasificarse en rendimiento a largo plazo e incerteza. Las tecnologías MAT son relativamente nuevas, teniendo las más antiguas no más de 18 años. Mientras que el rendimiento ha sido por lo general satisfactorio, es necesaria una mayor cantidad de investigación acerca de la equivalencia en vida útil y rendimiento de las mezclas tibias con respecto a las convencionales.

2.4.7 Ventajas y desventajas de las MAT

La principal característica en torno a la que gira la innovación introducida por estas mezclas es la reducción de temperatura conseguida durante el proceso productivo y de extendido. Pero estos métodos son realmente innovadores dados los beneficios que traen consigo, que abarcan distintos campos. A lo largo de esta sección se clasifican las principales ventajas, de modo que quede claro el auténtico avance y ahorro que suponen estas mezclas asfálticas. Sin embargo, como ya se ha esbozado en algunos de los puntos anteriores, no todo son ventajas a la hora de hablar de MAT. También suponen un riesgo dada su temprana edad, y aparecen una serie de dudas o problemas que, en caso de confirmarse y mantenerse, supondrían una serie de desventajas importantes.

2.4.7.1 Ventajas

Las mezclas asfálticas tibias suponen una serie de beneficios como consecuencia de su uso. Qué beneficios específicos y qué grado de importancia tienen dependerán del tipo de tecnología usada, así como del producto en concreto. Conforme a la mayoría de los autores consultados [1,4,14,31,,44], los beneficios que conlleva el uso de tecnologías MAT pueden agruparse del siguiente modo:

- Beneficios ambientales y de emisiones
- Beneficios económicos
- Beneficios de producción
- Beneficios de pavimentación (extendido y compactación)

Dado que cada uno de ellos cuenta con peso y entidad propios, vamos a analizarlos más profundamente.

a) Beneficios ambientales

El beneficio más evidente de la reducción de la temperatura de mezclado, corresponde al ahorro de combustible, lo que además conlleva a una disminución de las emisiones de dióxido de carbono y una disminución de los olores generados en las plantas y sitios de pavimentación.

En cuanto a la reducción del consumo, se han reportado valores entre 20% a 35% de ahorro dependiendo del tipo de tecnología utilizada, contenido de humedad y eficiencia de la planta. Estos porcentajes equivalen a una reducción de aproximadamente 1,5 a 2 litros de combustible por tonelada de mezcla, aumentando el ahorro en la utilización de material reciclado [8].

Por su parte, la reducción de las emisiones se encuentra estrechamente ligada al ahorro experimentado, es por esto que se han informado reducciones que se encuentran entre los 20% a 35% en cuanto a la liberación de dióxido de carbono equivalente al ambiente, lo que significa que por cada tonelada de asfalto producida con tecnologías MAT se dejan de emitir entre 4,1 a 5,5 Kg de CO₂ [29].

En cuanto a los olores y humos generados en las plantas de mezclado y en los sitios de construcción, el aporte de estas tecnologías se aprecia a la vista. Existen reportes que manifiestan una reducción de un 30% de estos factores y otros más optimistas que lo cuantifican en un 90%. Esto trae consigo valiosos beneficios en cuanto a la salud de los operarios y a vecinos de las plantas o sitio de construcción, mejorando el ambiente de trabajo y según lo indicado por el Germán Bitumen Forum, la exposición a mezclas elaboradas a 130 °C puede ser menor a la mitad de la exposición experimentada con mezclas elaboradas a 160 °C [8].

b) Beneficios económicos

La reducción que se produce en el consumo energético como consecuencia del uso de las mezclas tibias es otro de los beneficios del que se habla ampliamente en la bibliografía consultada. Es casi unánime que estas mezclas provocan un menor consumo, y en aquellas obras donde se midió en comparación con las mezclas convencionales en caliente, se reportan disminuciones del 20% a 40%, dependiendo de cuan grande era la producción [21]. Estos porcentajes pueden ser aún mayores en mezclas usando tecnologías Low Energy Asphalt o LEAB, donde parte de los áridos no son calentados por encima del punto de ebullición de agua [14].

La importancia de este beneficio radica principalmente en el tipo de energía que se utilice en el proceso de producción, que tan contaminante sea y cual sea su costo monetario [4]. En la mayoría de los países el costo de la energía es relativamente elevado y por lo tanto este beneficio puede tener una importancia grande de para al productor. En aquellos países donde las fuentes de energía son renovables o relativamente baratas, este beneficio cobra menor importancia. También es importante tener en cuenta que existen una serie de costos adicionales para las plantas a la hora de producir las mezclas tibias, como por ejemplo son el costo de los aditivos, las patentes, las modificaciones de la planta, etcétera.

Por otro lado, un beneficio secundario relacionado con los aspectos económicos es comentado por algunos autores y es el hecho de que las menores temperaturas de producción pueden resultar en un menor desgaste de la planta asfáltica [21].

c) Beneficios de producción

En el caso de las mezclas asfálticas tibias, quizás los beneficios productivos sean los menos importantes. Principalmente, la ventaja relacionada con la producción es la posibilidad de incluir mayores porcentajes de asfalto reciclado (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP). Debido al aumento de la trabajabilidad que se produce en estas mezclas como consecuencia de la menor viscosidad y del menor envejecimiento del asfalto, se contrarresta la rigidez que el uso de RAP provoca en las mezclas que lo incluyen [45]. Algunos autores [12,14] coinciden en afirmar que porcentajes de RAP superiores al 50% pueden añadirse a las mezclas.

Varios estudios han concluido que la posibilidad de un uso mayor de asfalto reciclado en las mezclas convencionales puede ayudar a superar los costos iniciales aumentados, conservar los recursos naturales y evitar problemas de eliminación. Además de esto, las propiedades del asfalto reciclado correctamente diseñado han demostrado ser comparables a aquellas que poseen los asfaltos de nueva producción [1].

Además de esta ventaja, el menor envejecimiento que se produce en el asfalto es también un factor a tener en cuenta [4]. Debido a ello se cree que se puede producir una mejora en la vida útil de los pavimentos, pero debido a que las investigaciones en torno a este aspecto son relativamente nuevas, de momento no se ha demostrado. Finalmente, otro beneficio en este campo, que está directamente relacionado con la reducción de la emisión de humos, es la posibilidad de situar plantas asfálticas cerca de áreas urbanas, con el correspondiente ahorro en transporte [21].

d) Beneficios de pavimentación (extendido y compactación)

Existen varios beneficios además de los mencionados, ligados a la disminución de la viscosidad con la utilización de las técnicas de mezclas tibias. De esta forma, mejorando la

trabajabilidad de la mezcla, la compactación se puede desarrollar a temperaturas más cercanas a la de ambiente, debido a esto, es posible enfriar la mezcla más rápido permitiendo una pronta abertura al tránsito de la vía [48].

También, aumentando la temperatura de producción de las mezclas tibias a los niveles de las mezclas calientes, es posible incrementar la brecha entre la temperatura de mezclado y la de compactación, permitiendo de esta forma aumentar la distancia de traslado de la mezcla y aumentar el tiempo de compactación. También es posible prolongar el tiempo de pavimentación a condiciones climáticas más frías debido a la menor diferencia de temperatura entre la mezcla y el ambiente, lo que causa una caída menos dramática del calor de la mezcla [4]. Además, con la menor diferencia de temperatura entre mezcla y ambiente, la construcción y apertura al tráfico puede ser más breve, lo que es perfecto en algunas situaciones complicadas, tales como rehabilitaciones de aeropuertos, autovías especialmente transitadas, etc. [44]

Algunos estudios indican que los aditivos de mezclas tibias actúan como facilitadores de la compactación, permitiendo reducir los esfuerzos requeridos para la compactación. Esta característica en conjunto con el efecto de menor envejecimiento del asfalto, por el mezclado a menor temperatura, permiten aumentar los contenidos de asfaltos reciclados (RAP) [7].

2.4.7.2 Desventajas

A pesar de las ventajas comentadas por diversos investigadores, el uso de las mezclas tibias aún se encuentra en etapa preliminar incluso en las naciones de origen, teniendo en cuenta que la primera carpeta generada a partir de estas tecnologías se desarrolló en 1999, no es posible conocer aún su comportamiento a largo plazo, además, se debe tener en cuenta que las pruebas elaboradas en Europa se encuentran en su mayoría auspiciadas por empresas privadas, que tiene sus intereses puestos en el buen funcionamiento de su producto.

En Estados Unidos las pruebas construidas por entes gubernamentales datan del año 2004, de todas formas, hasta el momento no se han obtenido comportamientos considerablemente menores en comparación a las mezclas calientes, pero se desconocen los costos asociados a la mantención a largo plazo de estas mezclas [47].

Además de lo mencionado, los costos de los aditivos y las instalaciones necesarias podrían ser mayores que los beneficios asociados a su uso. De esta forma los constructores no utilizarían estas tecnologías mientras no existan regulaciones de emisiones o problemas constructivos que limiten el uso de las actuales mezclas calientes de asfalto [47].

En cuanto a los beneficios medio ambientales, se debe evaluar realmente cuales son las ventajas, debido a que la disminución de las emisiones pueden ser compensadas por la elaboración y traslado de los aditivos y equipos necesarios para desarrollar las mezclas tibias [47].

Algunas tecnologías como el espumado y la posibilidad de que los agregados no sean secados completamente, pueden contribuir con la incorporación de agua en la mezcla, debido a la posibilidad de que esta no sea evaporada completamente, lo que podría conllevar a problemas de ahuellamiento prematuro y el efecto de “*stripping*” del pavimento [47].

Como ya se ha dicho para el caso de los beneficios, cada tipo de tecnología y cada producto específico deberían ser tratados separadamente, ya que cada uno de ellos tiene sus beneficios e inconvenientes. Sin embargo, en esta sección se va a intentar reunir de nuevo todos los productos en un único grupo, destacando sus principales desventajas. Mientras que hay grandes promesas en torno al uso de estas mezclas y sus menores temperaturas de producción y extendido, también existen preocupaciones, principalmente relacionadas con el rendimiento e implementación de las mismas, especialmente sobre especificaciones y control de la calidad. Así pues, más investigación se hace necesaria en una serie de campos que van a ser analizados a continuación.

a) Deformaciones permanentes

Tanto como el menor envejecimiento del asfalto durante el proceso productivo (debido principalmente a las menores temperaturas de trabajo) como el aumento de la sensibilidad a la humedad de estas mezclas, se traducen en un incremento de la posibilidad de formación de deformaciones plásticas en el pavimento, generalmente conocidas como roderas o ahuellamiento. Se

cree que la principal tendencia es la formación de las mismas al principio de la vida del pavimento, ya que con el paso del tiempo el asfalto va envejeciéndose y endureciéndose, siendo menos probables dichas formaciones [1].

b) Costos económicos

Aunque de entrada el uso de estas mezclas promete traer importantes ahorros energéticos que se traducen en menor gasto, existen costos iniciales, que unidos a posibles *royalties*, pueden resultar en un importante inconveniente para los contratistas, que no van a usar estas tecnologías únicamente por el resto de beneficios (a no ser que se apliquen regulaciones acerca de emisiones más estrictas) [21]. Por lo tanto, teniendo en cuenta aspectos económicos, los costos iniciales pueden suponer una barrera importante, pero también otros costos, como aquellos denominados recurrentes o *royalties*, tienen que ser tenidos en cuenta. Los costos iniciales varían dependiendo de la tecnología usada. El uso de tecnologías MAT requiere en algunos casos aditivos, un costo recurrente, y/o modificaciones de la planta asfáltica, lo que requiere inversión de capital.

Con vistas al futuro, estas tecnologías pueden traer importantes ahorros si se consigue un mayor rendimiento a largo plazo de las mezclas durante la producción y vida de servicio; sin embargo, esto aún no se ha demostrado del todo dado el corto tiempo en el que estas mezclas han sido usadas [47].

c) Sensibilidad a la humedad (agua)

Las menores temperaturas de producción usadas en las mezclas tibias pueden aumentar el daño potencial debido a la humedad. Parece haber dos causas principales para que se produzca este problema. Primero, temperaturas más bajas de producción y compactación puede resultar en un secado incompleto de los áridos [8]. Para prevenir esta sensibilidad al agua se debe realizar un diseño de la mezcla apropiado. De los muchos modos que hay de prevenir la remoción en los pavimentos, el uso de agente *anti-striping* (ASAs) es el método más común. Uno que se utiliza muy a menudo es la cal. Basados en investigaciones y experiencias anteriores, es razonable creer que añadiendo agentes apropiados de efecto *anti-striping* se puede aliviar el problema [44].

La segunda causa que puede producir sensibilidad al agua es el uso de los mencionados ASAs. Cuando estos agentes son mezclados con el asfalto y posteriormente con el árido y aditivo que introduce agua, se pueden producir algunas reacciones químicas entre los ASAs y los aditivos, debido a las altas temperaturas a las que se produce el mezclado, y que pueden resultar en una pérdida de adhesión en la mezcla [49]. No existen muchas investigaciones llevadas a cabo en esta área, es decir, en determinar los efectos de ASAs líquidos con aditivos MAT, que como hemos dicho puede llevar a daño por humedad y a un posterior fallo del pavimento.

d) Rendimiento a largo plazo

En un ciclo de vida útil de un pavimento, si las mezclas asfálticas tibias no tienen un rendimiento similar o mejor que las mezclas convencionales en caliente, no se puede hablar de beneficios ambientales a largo plazo o de ahorros energéticos [14]. Debido a la relativa novedad que suponen estos productos, los ensayos de campo o *in situ* son limitados en número, y también tienen un periodo de vida corto (cerca de 10 años en EE.UU. y poco más de 13 años en algunos países europeos). Por este motivo, no es aceptable actualmente hablar de rendimiento a largo plazo. Hasta la fecha, en EE.UU. no se han notado importantes efectos negativos en el rendimiento a largo plazo [20], y en Europa las secciones de ensayo de mezcla tibia han tenido un comportamiento igual o mejor que las convencionales [14]. Es importante destacar que mientras que EE.UU. la mayoría de los ensayos han sido llevados a cabo por organismos públicos (DoTs – Departments of Transport), en Europa las compañías privadas que comercializan los productos son las responsables de estas investigaciones, lo cual, en algún modo significa una revisión menos independiente de las diferentes tecnologías de mezclas tibias.

2.4.7.3 Posibles campos de especialización de las MAT (posibles aplicaciones específicas)

En un principio, no existen como ya hemos visto ningún tipo de limitaciones para la producción y uso de mezclas asfálticas tibias y estas tecnologías pueden usarse para las mismas composiciones que las convencionales. Sin embargo, las tecnologías MAT prometen una serie de beneficios que ya se han explicado anteriormente. Estas ventajas sobre las mezclas calientes tradicionales pueden ser usadas en algunas circunstancias específicas de pavimentación y producción y permiten que las mezclas tibias no sean solo un sustituto de las mezclas convencionales en caliente, sino que también sean útiles para circunstancias donde estas no puedan ser utilizadas. A continuación se presenta una lista de posibles aplicaciones específicas de estas mezclas tibias:

- Aumento del porcentaje de asfalto reciclado: Dada la menor viscosidad del asfalto en condiciones de trabajo, las mezclas tibias pueden contener un mayor porcentaje de RAP que el que contienen usualmente, manteniendo el mismo grado de trabajabilidad. En Alemania se han llevado a cabo ensayos con porcentajes de RAP del 90 al 100%; en estos casos se usaron Aspha - Min y Sasobit [14].
- Situación de plantas en lugares urbanos: La producción de mezclas tibias puede permitir que sea menos contaminante producir en plantas asfálticas ubicadas en áreas urbanas, dada la menor producción de humos y emisiones.
- Tiempos de construcción y apertura menores: Debido al menor enfriamiento necesario para estas mezclas, es posible que tanto la construcción de las carreteras, como la apertura de las mismas al tráfico sean más breves. Esto puede ser de especial utilidad en aeropuertos (ya se ha realizado en el aeropuerto de Frankfurt [44]) y en carreteras con elevado índices de uso.
- Pavimentación en tiempos fríos: A través de la reducción de la viscosidad del asfalto, las mezclas tibias pueden ser compactadas a menores temperaturas consiguiendo la misma densidad que las mezclas asfálticas en caliente y, dado que la diferencia de temperatura entre la mezcla y el ambiente es menor que para las convencionales, la ventana en la cual se puede realizar la compactación es mayor.
- Acceso a áreas de emisiones restringidas: De manera similar a la pavimentación en tiempo frío, mayores distancias de transporte son posibles debido a que las mezclas pueden ser compactadas a menores temperaturas. Por lo tanto, produciendo las mezclas tibias a la misma temperatura que las convencionales puede servir para abastecer lugares más distantes sin perder trabajabilidad. Esto significa mayores áreas de mercado y disminución de los costos de movilización y accesibilidad a grandes áreas urbanas. Según D'Angelo et al. [7], WAM - Foam fue almacenado en un silo durante 48 horas y tenía aún las propiedades necesarias para extenderlo y compactarlo a un nivel normal. Datos similares [7] se han obtenido para el Low Energy Asphalt (LEA). Éste fue mantenido en camiones a una temperatura de 70 a 90 °C durante 5 a 6 horas sin que posteriormente se experimentasen problemas para compactación.

2.4.8 Investigación nacional referente al uso de zeolita natural chilena en mezclas asfálticas tibias

En cuanto a la utilización de zeolita natural chilena en la fabricación de mezclas asfálticas, sólo existe a la fecha una investigación orientada a determinar el efecto de la incorporación de zeolita en la temperatura de producción de mezclas asfálticas [6].

Esta investigación analiza el comportamiento de un asfalto CA-24 con incorporación de dos tipos de zeolitas, una de origen sintético y otra natural chilena de clasificación clinoptilolita. Dicho comportamiento se estudia bajo cuatro etapas: la primera, establece, mediante el grado de

recubrimiento de los agregados, una temperatura de mezclado que se encuentra dentro del rango de producción de MAT; la segunda, formula un proceso de mezclado entre el asfalto y las zeolitas; la tercera, genera un análisis preliminar del comportamiento de las zeolitas con el ligante respecto a la expansión y vida media del espumado resultante, además de obtener la capacidad de adherencia del asfalto-zeolita al agregado mineral; la cuarta etapa, estudia las características del asfalto y asfalto-zeolita en estado original, envejecido en horno de película delgada rotatoria (HPDR) y en cámara de presión (PAV).

Debido a que no se disponía de antecedentes sobre la dosificación de zeolita natural para la producción de MAT, se decidió realizar una comparación de este mineral con la zeolita sintética, respecto al agua liberada. Para esto, se sometió a ambos materiales a una deshidratación en homo, considerando una temperatura de 135°C y un tiempo de 8 horas. Los resultados arrojaron una liberación de agua de 10,8% para la zeolita sintética y 11% para la zeolita natural. Por lo tanto se utilizó igual dosificación para ambas zeolitas, 0,3% en peso de la mezcla, y además, para analizar la variabilidad de la zeolita natural, se empleó una concentración adicional de 0,4%.

Este estudio entrega como principal resultado la factibilidad de utilizar zeolita natural chilena en la producción de mezclas asfálticas dentro del rango de temperatura de MAT.

A continuación se expone un resumen de los resultados obtenidos en la investigación citada anteriormente [6]. Estos datos constituyen el marco referencial inmediato de la presente investigación que analiza el comportamiento de mezclas asfálticas con zeolita natural chilena.

2.4.8.1 Validación de la temperatura de mezclado

Para la definición de la temperatura de mezclado se realizó una suposición de temperatura de acuerdo a los siguientes antecedentes:

- En primer lugar, se consideró la temperatura de mezclado bajo el concepto de trabajabilidad, expuesta en el punto 8.302.42 del Manual de Carreteras, donde se define como aquella en la que el ligante asfáltico presenta una viscosidad de 170 ± 20 cSt. Aplicada al asfalto estudiado se obtuvo una temperatura de 150°C.
- En segundo lugar, se consideró el rango de producción de MAT y la reducción de la temperatura de mezclado con el uso de zeolitas sintéticas.

En base a los antecedentes señalados y considerando la variabilidad de la zeolita natural, se propuso una reducción conservadora de la temperatura de mezclado a 135°C.

Para validar dicha temperatura, se desarrollaron ensayos de recubrimiento de los agregados pétreos con el uso de asfalto base y asfalto base más las distintas dosificaciones de zeolita. Para medir la capacidad de recubrimiento se utilizó la norma ASTM D2489/D2489M-08 "*Standard Practice for Estimating Degree of Particle Coating of Bituminous-Aggregate Mixtures*", complementada con los puntos 4.1 c) d) y e) del procedimiento 8.302.42 del Manual de Carreteras "*Método para determinar la deformación en mezclas asfálticas utilizando la máquina de ahuellamiento*", en donde se normaliza la elaboración de la mezcla.

Los ensayos realizados mostraron un recubrimiento del árido de 72% a 135°C y 99% a 150°C para la mezcla sin zeolita. Para mezcla con 0,3% de zeolita, se obtuvo un recubrimiento del árido del 100% a 135°C y 99% a 150°C.

2.4.8.2 Validación del procedimiento de mezclado

En esta etapa, se desarrolla el procedimiento de mezclado del asfalto con las zeolitas, el que se fundamenta en tres variables de gran importancia, que permiten controlar el envejecimiento prematuro del cemento asfáltico en la etapa de mezclado con la zeolita, estas son: la temperatura, el tiempo y la homogeneidad de la mezcla.

El procedimiento propuesto para mezclar el asfalto y la zeolita es el siguiente:

- Fluidificar el asfalto a 135°C por un periodo de 1,5 horas en homo.

- Verter 400±10 g del ligante a un recipiente estándar de mezclado calentado previamente a la misma temperatura.
- Incorporar el recipiente de mezclado con el ligante asfáltico en el homo por un periodo de 30 minutos para homogeneizar el sistema.
- Precalentar la placa calefactora a 150°C.
- Retirar el recipiente de mezclado y el ligante asfáltico del homo, disponerlo sobre la placa calefactora e introducir la hélice del mezclador en el asfalto.
- Forrar el recipiente con una funda aislante y taparlo con papel aluminio grueso para asegurar una buena transmisión y reducir las pérdidas del calor.
- Estabilizar el sistema por 20 minutos con el mezclador encendido a 1000 RPM.
- Incorporar la zeolita y dejar mezclar por 5 minutos, conformando una mezcla homogénea.

El procedimiento señalado fue validado por medio de una comparación entre las características de consistencia, seguridad y pureza del asfalto original sometido al proceso anterior y una muestra del mismo material sometido al proceso de mezclado con zeolita.

Los resultados mostraron que las características de consistencia, seguridad y pureza del asfalto base no se alteran con el procedimiento de mezclado propuesto ni con la incorporación de la zeolita.

También fue evaluada la homogeneidad de la mezcla asfalto-zeolita con un 0,3% de adición. La mezcla presentó el mismo grado de penetración a 25°C para los tres tercios evaluados y los mismos puntos de ablandamiento, demostrándose que el procedimiento de mezclado produjo una mezcla homogénea.

Lo relevante de estos resultados es que los cambios que se obtengan en las mezclas asfalto-zeolita pueden ser considerados como un efecto derivado de la incorporación de zeolita y no del proceso de mezclado.

2.4.8.3 Evaluación de asfalto-zeolita

Se realizó un análisis preliminar donde se propuso la dosificación de zeolita natural a utilizar; se estudiaron las características del espumado inducido por la incorporación de zeolitas al asfalto y se comprobó la adhesividad de la mezcla asfalto-zeolita con el agregado mineral.

La expansión del asfalto inducida por el uso de zeolita, se midió durante los primeros cinco minutos una vez incorporada la zeolita. Los resultados obtenidos indicaron que la zeolita natural tiene una tasa de liberación de agua mayor que la zeolita sintética, pero esta última presenta una vida media mayor. Así, la zeolita natural logra una mayor expansión del asfalto durante los primeros 5 minutos evaluados.

Para verificar la adhesión del par asfalto-zeolita con el agregado mineral, se realizó lo estipulado en el procedimiento 8.302.29 del Manual de Carreteras "*Método estático para determinar la adherencia agregado-ligante asfáltico*" que estipula mantener sumergidas las muestras en agua destilada a 20°C por 18 horas. Se obtuvo como resultado que todas las muestras presentaban un porcentaje de recubrimiento mayor al 95%, no efectuándose desprendimientos en ninguna de ellas durante el transcurso del ensayo.

2.4.8.4 Clasificación del asfalto

Finalmente se realizó un estudio de las propiedades del asfalto y asfalto-zeolita. Para esto, se realizó una caracterización por medio de las medidas de consistencia, durabilidad, susceptibilidad térmica, seguridad y pureza, además, de someter las muestras a los procesos de envejecimiento, para cuantificar la variabilidad de estas en el transcurso de su vida útil. Las muestras comparadas fueron las siguientes:

- Base 163: asfalto base ensayado en estudio anterior, analizado en estado original, HPDR a 163°C y PAV.
- Base 135: asfalto base, analizado en estado original, HPDR a 135°C y PAV.

- Zeolita sintética 0,3%: mezcla de asfalto base con zeolita sintética con una dosificación de 0,3% respecto al peso de la mezcla asfáltica, analizada en estado original, HPDR a 135°C y PAV.
- Zeolita Natural 0.3%: mezcla de asfalto base con zeolita natural con una dosificación de 0,3% respecto al peso de la mezcla asfáltica, analizada en estado original, HPDR a 135°C y PAV.
- Zeolita Natural 0.4%: mezcla de asfalto base con zeolita natural con una dosificación de 0,4% respecto al peso de la mezcla asfáltica, analizada en estado original, HPDR a 135°C y PAV.

a) Viscosidad a 60 °C y 135 °C

Los asfaltos sometidos a menor temperatura de mezclado presentaron menor viscosidad al ser evaluados en estado HPDR y PAV, y menor envejecimiento a corto (HPDR) y largo (PAV) plazo. Por su parte, las mezclas con zeolita mostraron una viscosidad mayor en estado original en relación a las muestras sin zeolita (base 163 y base 135) debido a la incorporación de componentes sólidos al ligante. Sin embargo, los índices de durabilidad presentaron valores similares a los obtenidos con la muestra base 135, lo que afirma que la zeolita no afecta los procesos de envejecimiento.

b) Penetración a 25 °C

En cuanto a la penetración a 25°C, las muestras de asfalto con zeolita redujeron la penetración con respecto a la muestra base 135 en estado original y después del HPDR, sin embargo, luego del PAV se presentaron valores similares de penetración. Al comparar con la muestra sin zeolita base 163, las muestras elaboradas con zeolita, presentaron inicialmente una pequeña disminución de la penetración, sin embargo, luego de ser sometidas a los procesos de envejecimiento, las muestras con zeolita natural presentan un comportamiento ligeramente más blando.

c) Punto de ablandamiento

Al comparar las muestras que contenían zeolitas con base 135, se observan diferencias en estado original donde los aditivos generarían un aumento en la dureza del material, sin embargo, una vez sometidas las muestras a los procesos de envejecimiento, las diferencias entre ellas se hicieron despreciables.

En cuanto a la comparación entre base 163 y las muestras con zeolitas, se apreció un aumento en el punto de ablandamiento en estado original, sin embargo, luego de ser sometidas a los procedimientos de envejecimiento, la base 163 presentó un mayor valor en sus resultados, indicando que las zeolitas aumentan el punto de ablandamiento del ligante asfáltico en menor grado, que la disminución provocada por la reducción de la temperatura de envejecimiento en HPDR.

d) Punto de fragilidad de Fraass

El comportamiento de las muestras con zeolitas respecto a base 135, presentó resultados dentro de los límites de repetitividad en los tres estados del asfalto, solo se apreció una disminución de -1°C luego de someter el asfalto al envejecimiento en PAV.

Al comparar las muestras que contienen zeolita con base 163, estas presentan una disminución de -3°C luego del HPDR y una disminución de -2°C luego del PAV. Lo que indica que la incorporación de las zeolitas permitiría, por medio de la reducción de la temperatura de mezclado, mejorar las características del asfalto ante el agrietamiento térmico.

Las muestras elaboradas con zeolitas presentaron un comportamiento totalmente homogéneo respecto al punto de fragilidad.

e) Ductilidad a 25 °C, 15 °C y 5 °C

Se concluyó que las zeolitas afectan de forma considerable la ductilidad de la mezcla, pues generan un medio heterogéneo. La reducción de la ductilidad es aproximadamente de un 67% respecto a Base 135 una vez incorporada la zeolita, la diferencia se mantiene luego de someterla al

HPDR y se reduce a un 37% luego del PAV. Sin embargo, se debe considerar que los resultados de los asfaltos con zeolita se vieron afectados por la mayor consistencia que presentaban por el hecho de contener un árido (zeolita). Se estima que debiera haberse incluido otro árido no reactivo a los asfaltos sin zeolita para que así todas las muestras tuvieran una consistencia similar.

f) Recuperación elástica torsional a 25 °C y 40 °C.

Dichos ensayos se llevaron a cabo para averiguar si las zeolitas producían algún cambio en el comportamiento elástico del asfalto. De esta forma, se concluyó de la comparación entre asfaltos originales y muestras con zeolita, que la incorporación de las zeolitas no presentaban una diferencia significativa en las propiedades elásticas del asfalto al que se incorporaron.

g) Suceptibilidad térmica (Índice de penetración)

Se observó que las zeolitas no generan un cambio significativo en el índice de penetración, indicando a su vez que la susceptibilidad térmica del asfalto-zeolita se encontraba dentro de los rangos esperados para asfaltos utilizados comúnmente en la construcción de pavimentos

h) Medida de seguridad (Punto de inflamación)

Se determinó que el uso de zeolitas no produce peligro debido a que el punto de inflamación aumentó en un 4%, obteniéndose valores por sobre los 232°C reglamentados por el Manual de Carreteras.

i) Medidas de pureza (Solubilidad, Ensayo de la mancha, Pérdida de masa)

En cuanto a la solubilidad, como era de esperar, al ser la zeolita un material inorgánico, presentó una cantidad de material retenido en el filtro, que en base al porcentaje, representaría la concentración aproximada de zeolita respecto al peso de ligante asfáltico utilizado en cada muestra.

Referente al ensayo de la mancha, el asfalto utilizado en el estudio no presentó cambios en la relación de asfaltenos y maltenos por sobre un 20% de xilol, tanto en la muestra compuesta solo por asfalto como también en las muestras asfalto-zeolita. De esta forma se puede indicar que el uso de zeolitas no generará un aumento de la rigidización o envejecimiento del asfalto en el desarrollo de mezclas tibias.

Por último, en relación a la pérdida de masa, entre las muestras asfalto-zeolita se observó una pérdida de masa, siendo la zeolita natural al 0,4% la que presentó una mayor disminución. Este fenómeno es principalmente influenciado por la pérdida de agua que sufre el material ante un mayor tiempo de exposición a altas temperaturas. En general, la pérdida o ganancia de masa en las muestras analizadas no presentó una variabilidad significativa.

3. Diseño experimental

De acuerdo a la metodología implementada, a continuación se dan a conocer los antecedentes que permiten describir cómo se estructura la actividad experimental de la presente investigación. Se precisan las etapas de la actividad experimental y lo realizado en ellas, se definen las variables involucradas y como se evaluaron.

3.1 Etapas de la actividad experimental

Primeramente se realizaron algunos ensayos y procedimientos para caracterizar los áridos y la zeolita. Entre ellos se encuentran la realización de granulometrías y ensayos de hidratación y deshidratación de la zeolita con el fin de precisar los porcentajes de agua presente en la zeolita y la forma en que esta libera el agua.

En a Figura 3.1 se muestra un esquema general de las etapas de la actividad experimental.

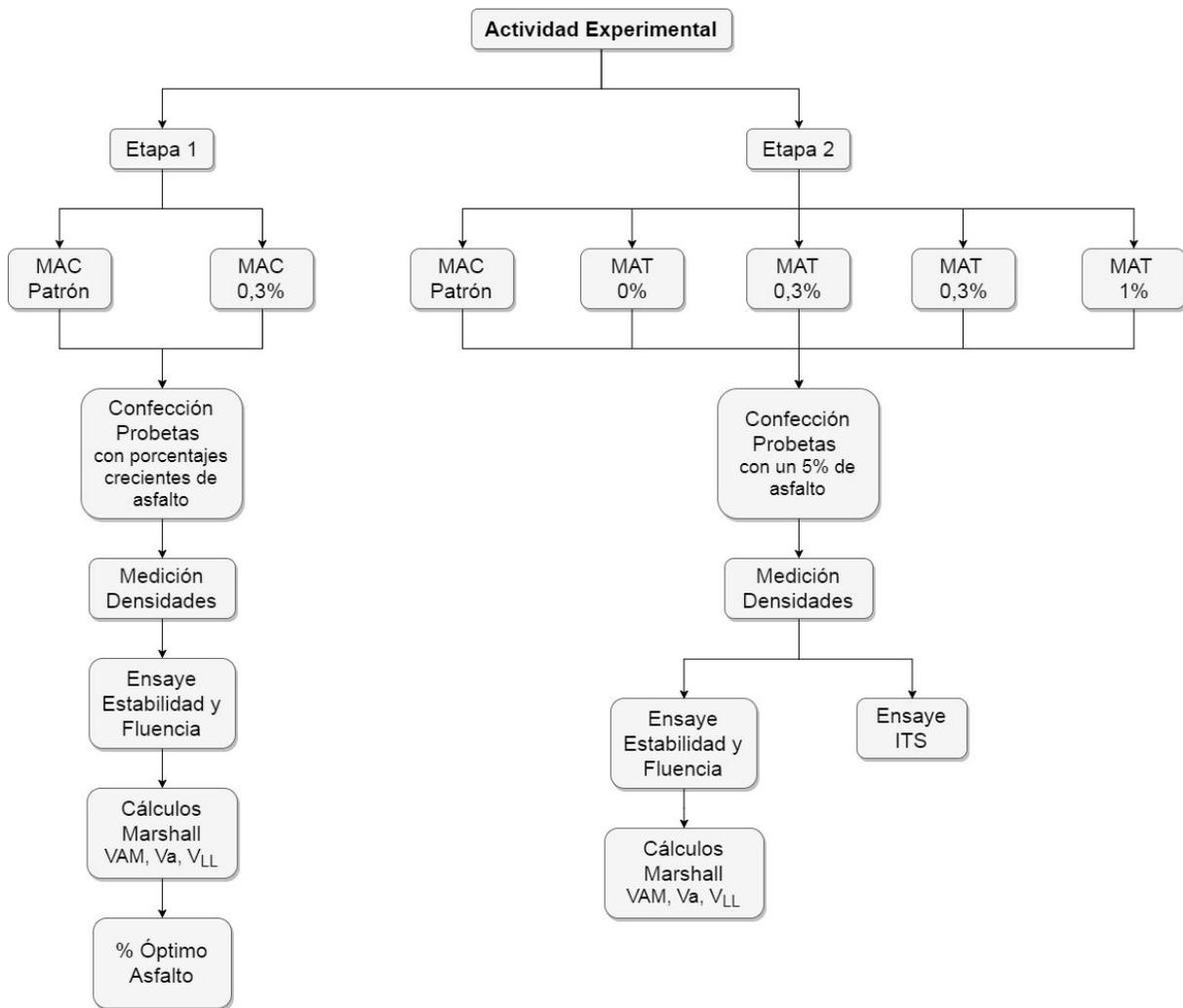


Figura 3.1 – Esquema general de las etapas de la actividad experimental.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

3.1.1 Primera etapa

En esta etapa se evalúa el comportamiento de una mezcla asfáltica en caliente con incorporación de zeolita natural chilena y se verifica si la inclusión de zeolita tiene algún efecto en las propiedades volumétricas y mecánicas consideradas por el método de diseño Marshall. También se evalúa si la incorporación de zeolita natural chilena produce alguna variación en la obtención del porcentaje óptimo de asfalto.

Para dar cumplimiento a lo anterior, se diseñó primeramente una mezcla asfáltica caliente (MAC) denominada “MAC Patrón”, mediante el método Marshall. Dado que ésta mezcla asfáltica se fabricó a las temperaturas convencionales de mezclas en caliente según la normativa chilena, esta mezcla se presenta como parámetro o patrón de comparación en el análisis del comportamiento de la mezcla asfáltica con incorporación de zeolita.

Seguidamente se diseñó una mezcla asfáltica, mediante el método Marshall, con inclusión de 0,3% de zeolita natural chilena, respecto al peso del árido, en granulometría fina como reemplazo parcial del árido fino. Esta mezcla es denominada como “MAC 0,3%”. Posteriormente, todos los resultados obtenidos en este diseño son comparados con los resultados obtenidos en el diseño de la mezcla “MAC Patrón”.

En ambas mezclas se ha mantenido como constantes la banda granulométrica utilizada, los porcentaje de asfalto evaluados en el diseño Marshall y las temperaturas de producción. Las temperaturas de mezclado y compactación, como también los ensayos realizados a las mezclas, se muestran en Tabla 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1 – Resumen de las mezclas asfálticas fabricadas y temperaturas de producción en la etapa 1.

MEZCLAS	DESCRIPCIÓN	Contenido de Zeolita (%)	Temperatura de mezclado (°C)	Temperatura de compactación (°C)	Contenido de asfalto (%)
MAC Patrón	MAC convencional	0	165	150	4,0 - 4,5 - 5,0 - 5,5 - 6,0
MAC 0,3%	MAC con 0,3% de Zeolita	0,3	165	150	4,0 - 4,5 - 5,0 - 5,5 - 6,0

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Tabla 3.2 – Ensayos realizados a las mezclas asfálticas en la etapa 1.

MEZCLAS	Ensayos realizados		
	Densidad	Estabilidad	Fluencia
MAC Patrón	SI	SI	SI
MAC 0,3%	SI	SI	SI

Fuente: Elaboración propia, 2017.

3.1.2 Segunda etapa

En esta etapa se evalúa el efecto que tiene la incorporación de zeolita natural chilena en mezclas que son producidas en un rango de temperatura más bajo que las tradicionales mezclas en caliente.

Esta etapa busca generar los datos que permitan comparar, entre una mezcla asfáltica en caliente (MAC Patrón) y mezclas asfálticas tibias con incorporación de zeolita natural chilena, las propiedades volumétricas y mecánicas consideradas por el método de diseño Marshall y la resistencia a tracción indirecta, manteniendo como constantes la banda granulométrica utilizada y el porcentaje de asfalto. La inclusión de zeolita en las mezclas que son ensayadas en esta etapa, es en diversos porcentajes en reemplazo parcial del árido fino.

Se realizaron 3 mezclas asfálticas tibias (MAT) con incorporación de zeolita natural chilena en diversos porcentajes y una mezcla tibia sin zeolita denominada "Mezcla 0%". En la fabricación de estas mezclas se utilizó la misma banda granulométrica que las mezclas de la etapa 1 y el contenido óptimo de asfalto obtenido en el diseño de la "MAC 0,3%". Sin embargo, la temperatura de mezclado para estas mezclas se redujo en 30 °C. Posteriormente, estas mezclas tibias fueron sometidas al ensayo de resistencia a tracción indirecta (ITS). Los resultados que se obtuvieron son comparados con los obtenidos en el diseño y ensayo ITS de la "MAC Patrón".

Las temperaturas de mezclado y compactación, porcentajes de incorporación de zeolita y ensayos realizados a las diversas mezclas, se muestran en Tabla 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3 – Resumen de las mezclas asfálticas fabricadas y temperaturas de producción en la etapa 2.

MEZCLAS	DESCRIPCIÓN	Contenido de Zeolita (%)	Temperatura de mezclado (°C)	Temperatura de compactación (°C)	Contenido de asfalto (%)
MAC Patrón	MAC convencional	0	165	150	5,0
Mezcla 0%	MAT sin zeolita	0	135	125	5,0
Mezcla 0,3%	MAT con 0,3% de Zeolita	0,3	135	125	5,0
Mezcla 0,6%	MAT con 0,6% de Zeolita	0,6	135	125	5,0
Mezcla 1%	MAT con 1% de Zeolita	1	135	125	5,0

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Tabla 3.4 – Ensayos realizados a las mezclas asfálticas en la etapa 2.

MEZCLAS	Ensayos realizados			
	Densidad	Estabilidad	Fluencia	Tracción Indirecta
MAC Patrón	SI	SI	SI	SI
Mezcla 0%	SI	SI	SI	SI
Mezcla 0,3%	SI	SI	SI	SI
Mezcla 0,6%	SI	SI	SI	SI
Mezcla 1%	SI	SI	SI	SI

Fuente: Elaboración propia, 2017.

3.2 Variables de la investigación

En esta sección se presentan las variables involucradas en el diseño y posterior desarrollo experimental, en correspondencia con los objetivos planteados y la metodología de investigación.

Se presentan las variables de control como aquellas que permanecen constantes durante la experimentación, las variables independientes y las dependientes.

3.2.1 Variables involucradas en etapa 1

Variables de control:

- Granulometría de los áridos minerales
- Porcentajes crecientes de asfalto en las mezclas diseñadas
- Temperatura de producción

Variable independiente:

- Contenido de zeolita en la mezcla

Variables dependientes:

- Densidad real de la mezcla asfáltica compactada
- Estabilidad de la mezcla asfáltica compactada
- Fluencia de la mezcla asfáltica compactada

Los valores numéricos de estas variables dependientes corresponden a valores que se obtienen de ensayos realizados a probetas normalizadas.

A partir de los valores obtenidos de estas variables, se calcularon otras propiedades volumétricas que requiere el método de diseño Marshall y que también fueron sometidas al análisis.

- Porcentaje de vacíos en el agregado mineral
- Porcentaje de huecos de la mezcla asfáltica compactada
- Porcentaje óptimo de asfalto

3.2.2 Variables involucradas en etapa 2

Variables de control:

- Granulometría de los áridos minerales
- Porcentaje de asfalto en la mezcla
- Temperatura de producción

En cuanto a la temperatura de producción, todas las mezclas asfálticas tibias fueron fabricadas a la misma temperatura. No obstante en el análisis de resultados se considera también la comparación entre estas mezclas y la mezcla patrón que fue trabajada en los rangos de temperatura de mezclas en caliente, como fue mostrado en la Tabla 3.3.

Variable independiente:

- Contenido de zeolita en la mezcla

Variables dependientes:

- Densidad real de la mezcla asfáltica compactada
- Estabilidad de la mezcla asfáltica compactada
- Fluencia de la mezcla asfáltica compactada
- Resistencia a tracción indirecta

Los valores numéricos de estas variables dependientes corresponden a valores que se obtienen de ensayos realizados a probetas normalizadas.

A partir de los valores obtenidos de estas variables, se calcularon otras propiedades volumétricas que requiere el método de diseño Marshall y que también fueron sometidas al análisis.

- Porcentaje de vacíos en el agregado mineral
- Porcentaje de huecos de la mezcla asfáltica compactada

3.2.3 Definición de variables**3.2.3.1 Definición variables de control**

Granulometría de los áridos minerales: La banda granulométrica de los áridos combinados que se utilizan en la fabricación de las diversas mezclas asfálticas corresponde a una granulometría semidensa según los límites establecidos en la tabla 5.408.201.F del Manual de Carreteras, Vol. 5.

Porcentajes crecientes de asfalto en las mezclas diseñadas: Corresponden a los porcentajes de asfalto utilizados en el diseño Marshall de las mezclas “MAC Patrón” y “MAC 0,3%”, los cuales fueron 4%, 4,5%, 5%, 5,5% y 6% de asfalto con respecto al peso del árido mineral. Esta variable de control (constante) se definió en forma exclusiva para la Etapa 1 de la actividad experimental.

Porcentaje de asfalto en la mezcla: Para los materiales y granulometría utilizada, el porcentaje óptimo de asfalto utilizado para la fabricación de las mezclas tibias fue de 5% respecto del peso del árido mineral. Este valor se definió como una variable de control (constante) exclusiva para la Etapa 2 de la actividad experimental.

Temperatura de producción: En una investigación [6] realizada en nuestro país el año 2011 en donde se analizó el comportamiento de un cemento asfáltico CA-24 con la incorporación de zeolita natural chilena, se observó que el asfalto citado con dosis de 0,4% y 0,3% de zeolita respecto del peso del agregado mineral, presentaba recubrimientos del agregado pétreo de 99% a 100% de las partículas, para temperatura de mezclado de 135°C, frente a un 72% de recubrimiento del árido en mezclas sin zeolita. Por otra parte, dado los resultados citados, se verifica el efecto microespumante que inducen las zeolitas naturales, debido a que las mezclas elaboradas con su incorporación presentaron mejor recubrimiento del árido.

El recuento de las partículas recubiertas se llevó a cabo según lo estipulado en la norma ASTM D2489/D2489M-08.

En concordancia con lo citado, se estimó prudente utilizar la misma temperatura de mezclado en la producción de las mezclas tibias de este estudio, estableciendo una diferencia de aproximadamente 30° C en relación a la temperatura de mezclado de la mezcla MAC Patrón que se confeccionó para esta investigación.

Las temperaturas de mezclado y compactación para las mezclas asfálticas denominadas “calientes” (MAC) corresponden a 165 °C y 150 °C respectivamente. Por su parte las temperaturas de mezclado y compactación para las mezclas denominadas “tibias” (MAT) son de 135 °C y 125 °C, respectivamente.

3.2.3.2 Definición variable independiente

Contenido de Zeolita: Los porcentajes de incorporación de zeolita utilizados en este estudio se fundamentan en los siguientes antecedentes:

- Los porcentajes recomendados por los fabricantes de zeolita sintética para la elaboración de mezclas tibias oscilan entre 0,25% y 0,3% con respecto al peso de la mezcla.
- Zhanping You [41], determinó que no existe mayor diferencia en la viscosidad del asfalto PG 64-22 en la utilización de 0,3% o un 5% de Aspha-min (zeolita sintética con características similares a la usada en este estudio) con respecto al peso del árido.
- Un análisis de distribuciones promedio de las propiedades físicas y mecánicas desarrollado en Lituania [12], en tres tipos de mezcla, dio como resultado óptimo el uso de un 0,3% de zeolita sintética con respecto al peso del árido mineral.
- Finalmente, en la investigación referente a la influencia de la zeolita natural chilena en la temperatura de producción de mezclas asfálticas [6], se determinó que la zeolita natural chilena presenta porcentajes de liberación de agua muy similares a la zeolita sintética, aunque esta última lo hace a una tasa menor.

Por lo anterior, se consideró la incorporación de zeolita en dosis de 0,3% con respecto al peso del agregado mineral para la mezcla fabricada en caliente. Sin embargo, para el caso de las mezclas fabricadas a menor temperatura (MAT) se incorporó además zeolita en 0,6% y 1% con respecto al peso del árido mineral, para estimar las variaciones en los parámetros volumétricos y mecánicos de las mezclas frente a mayores contenidos de agua liberada.

3.2.3.3 Definición variables dependientes

Las variables dependientes, cuyas variaciones serán cuantificadas y analizadas son las siguientes:

Densidad real de la mezcla asfáltica compactada: De acuerdo con la NCh 22, es el cociente entre la masa (m) de una sustancia y su volumen (v) a una temperatura especificada. Se expresa en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3). La Densidad Real (G) es aquella en que se considera el volumen macizo de la mezcla compactada, mas el volumen de los poros accesibles e inaccesibles.

Estabilidad de la mezcla asfáltica compactada (Estabilidad Marshall): Carga máxima que soporta la probeta cuando se somete al ensaye Marshall que mide la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas compactadas. Se define la estabilidad Marshall como el número total de newtons (N) necesarios para producir la falla de la probeta a 60° C.

Fluencia de la mezcla asfáltica compactada: Es la deformación correspondiente a la carga máxima de rotura de una probeta en el ensaye Marshall. El valor de la fluencia se expresa en unidades de 0,25 mm. (1/100 pulgada).

Resistencia a tracción indirecta: Corresponde a la resistencia de una mezcla asfáltica compactada a fuerzas de tracción. El ensayo de tracción indirecta por compresión diametral reproduce el estado de tensión crítica para la mezcla asfáltica, en la fibra inferior de la capa asfáltica o zona de tracción.

Los valores numéricos de las variables anteriores, corresponden a valores que se obtienen de ensayos realizados a probetas normalizadas.

A partir de los valores obtenidos de estas variables, se calcularon otras propiedades volumétricas que requiere el método de diseño Marshall y que también fueron sometidas al análisis.

Vacíos de Aire (Huecos de aire o simplemente vacíos): Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada. Se expresa en porcentaje.

Vacíos en el agregado mineral: Los vacíos en el agregado mineral corresponden al volumen de vacíos entre las partículas de agregado de una mezcla compactada; incluye los huecos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como porcentaje del volumen total. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados.

Porcentaje óptimo de asfalto: Corresponde al contenido de asfalto que brinda máxima estabilidad, máxima densidad y un contenido de vacíos de aire de 5%. El valor obtenido como porcentaje óptimo de asfalto en el diseño Marshall de las mezclas “MAC Patrón” y “MAC 0,3%”, se definió como una variable dependiente exclusiva de la Etapa 1 de la actividad experimental.

3.2.4 Evaluación de variables

Para cuantificar las variaciones en las magnitudes de las variables dependientes a raíz de la incorporación de zeolita a las mezclas, se utilizaron los ensayos prescritos por el Manual de Carreteras referentes al Método de diseño Marshall y el Ensaye de Tracción Indirecta (Apéndice 1 al 4). Estos ensayos fueron elegidos conforme a las necesidades de la investigación y para obtener la información que permitió explorar el comportamiento de las mezclas asfálticas con adición de zeolita natural chilena.

Las muestras sobre las cuales se evaluaron las variables dependientes mediante la aplicaron de los ensayos, corresponden a las mezclas asfálticas diseñadas y fabricadas, y a los materiales que las componen. A su vez, en el caso de las mezclas asfálticas, los ensayos fueron aplicados a las probetas diseñadas que cumplían con los requisitos señalados en el Manual de Carreteras, Volúmenes 5 y 8. (Apéndice 1 al 4).

4. Desarrollo experimental

En este capítulo se da a conocer la fase operativa de la investigación, que implica todo el trabajo realizado en laboratorio para determinar y evaluar las variables descritas en el capítulo anterior. En este contexto, en los puntos 4.1 al 4.5, se detallan las características de los materiales utilizados, los procedimientos normados para la fabricación de mezclas asfálticas y probetas, y los ensayos utilizados. Finalmente, en los puntos 4.6 y 4.7, se presentan los resultados de trabajos experimentales preliminares referidos a la caracterización de materiales y diseño de la mezcla patrón, respectivamente.

4.1 Materiales utilizados

4.1.1 Cemento asfáltico

Se utilizó un cemento asfáltico tipo CA-24 60/80 para todas las mezclas realizadas. Sus características se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 - Características del cemento asfáltico.

Parámetro	Unidad	Valor	Especificación
Viscosidad 60°C	Poises	3953	Min. 2400 Poises
Viscosidad 135°C	Cst	492	Informar
Ductilidad 25°C, 5cm/min	cm	>100	Min. 100 cm
Ensaye de la mancha	% Xilol	<30	Max. 30%
Ensaye de la mancha	% Xilol	<20	Max. 20%
Punto de inflamación	°C	306	Min. 232 °C
Punto de ablandamiento	°C	52,8	Informar
Índice de penetración		-0,2	-2.0 a +1.0
Penetración 25°C, 100gr, 5 seg	0,1mm	58	60-80
Solubilidad en tricloroetileno	%	>99	Min. 99%
Temperatura de mezclado	°C	160 +/- 5	Informar
Temperatura de compactación	°C	148 +/- 5	Informar
Película Delgada Rotatoria			
Penetración (%Original)	%	63	Mín. 54%
Pérdida por calentamiento	%	-0,1	Max. 0,8%
Viscosidad 60°C	Poises	10150	Informar
Ductilidad 25°C, 5cm/min	cm	>100	Min. 100 cm
Viscosidad Absoluta 60°C	Pa*s	1384	Informar
Índice de durabilidad		2,6	Máx. 4.0

Fuente: Certificado de Análisis N°47422, empresa Probisa S.A., 2017.

4.1.2 Agregado mineral

El agregado mineral se encuentra dentro de la banda granulométrica semidensa IV-A-12 según la tabla 5.408.201.F del Manual de Carreteras (Tabla 4.2). Las constantes físicas y hídricas del material se detallan en Tabla 4.3. en página siguiente.

Tabla 4.2- Granulometría semidensa de áridos.

TAMICES		IV-A-12	IV-A-20
(mm)	(ASTM)	% QUE PASA EN PESO	
25	(1")		100
20	(3/4")	100	80 - 95
12,5	(1/2")	80 - 95	65 - 80
10	(3/8")	70 - 85	57 - 73
5	(N° 4)	43 - 58	40 - 55
2,5	(N° 8)	28 - 42	28 - 42
0,63	(N° 30)	13 - 24	13 - 24
0,315	(N° 50)	8 - 17	8 - 17
0,16	(N° 100)	6 - 12	6 - 12
0,08	(N° 200)	4 - 8	4 - 8

Fuente: Manual de Carreteras, numeral 5.408.201.F, volumen 5, año 2017 [43].

Tabla 4.3 - Constantes físicas e hídricas del agregado mineral.

Constantes Físicas e Hídricas		Gravilla 11/16	Gravilla 6/11	Polvo Roca 0/5
Densidad aparente	[kg/m ³]	1459	1474	1686
Densidad real seca	[kg/m ³]	2659	2651	2618
Densidad neta	[kg/m ³]	2737	2735	2734
Partículas chancadas	[%]	95	97	99
Partículas lajeadas	[%]	0	0,1	0,9
Índice de Lajas	[%]	23,9	11,2	9,7
Desgaste Los Ángeles	[%]	11,5	12,8	14,8
Desgaste Los Ángeles	Grado	5	6	7
Índice de plasticidad	[%]	N.P.	N.P.	N.P.

Fuente: Informe de Características de producto, CDI Probisa, 2015.

4.1.3 Zeolita

Dentro de las características mineralógicas de la zeolita en estudio podemos mencionar que el componente principal es la Clinoptilolita-Mordenita aún cuando posee otros componentes como Plagioclasa, Esmectita y Cuarzo.

En página siguiente se muestran las características físico-químicas de la zeolita utilizada (Tabla 4.4) y fotografías del producto (Figura 4.1).

Tabla 4.4 - Características físico-químicas de la zeolita utilizada.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS		
Composición química	SiO ₂	64,19
	TiO ₂	0,51
	Al ₂ O ₃	11,65
	Fe ₂ O ₃	2,53
	MnO	0,03
	MgO	0,66
	CaO	3,42
	Na ₂ O	0,75
	K ₂ O	1,6
	P ₂ O ₅	0,03
	PxC	14,64
Densidad	2,2 g/cm ³	
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	86,82 a 112,88 cmol/Kg	
Superficie específica (método BET)	446 a 480 m ² g ⁻¹	
Estabilidad térmica	<450 °C	
Estabilidad química (pH)	8,9	

Fuente: Ficha técnica del producto, Fertoza 2015.



Figura 4.1 – Vistas de la zeolita utilizada.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.2 Fabricación de mezclas asfálticas

Como se detallara en el capítulo anterior referido al diseño experimental, se confeccionó una serie de mezclas asfálticas en caliente y otras con una reducción en su temperatura de producción denominadas mezclas tibias. No obstante, todas las mezclas fueron diseñadas y fabricadas ajustándose a la normativa vigente.

La fabricación de las mezclas fue realizada a través del método de diseño Marshall, que describe una metodología para determinar un contenido óptimo de asfalto en las mezclas, para una determinada granulometría y propiedades de los áridos.

En esta sección nos remitiremos a explicar los procedimientos de laboratorio requeridos por el método de diseño y realizados en la investigación. Los cálculos y formulas involucradas en el método se detallan en Apéndice 2.

4.2.1 Preparación de probetas

4.2.1.1 proceso de mezclado

La preparación de las probetas de ensaye se realizó siguiendo lo estipulado en el volumen 8 del Manual de Carreteras, numeral 8.302.40 punto 3, (Apéndice 3).

En cuanto a la preparación del árido mineral a utilizar, primero fueron secados en horno hasta masa constante a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ para luego realizar la reconstitución granulométrica. Posteriormente se pesaron para cada probeta de ensaye, la cantidad necesaria de cada fracción de árido con el fin de producir una muestra que 1100 g. conteniendo los distintos tamaños de la granulometría semidensa (Ver Figura 4.2)



Figura 4.2 – (Izq.) Separación de áridos según tamaño, luego de tamizado, para reconstitución granulométrica. (Der.) Pesaje de las fracciones de árido para formar muestras de 1100 g. de árido en granulometría semidensa e incorporación de zeolita.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Para realizar el mezclado del árido con el asfalto, se calentó el árido en horno a una temperatura de aproximadamente 30°C por sobre la temperatura de mezclado y posteriormente se dispuso en el bol de mezclado.

Luego se formó un cráter en el agregado y se pesó la cantidad necesaria de cemento asfáltico a la temperatura de mezclado, vertiéndolo sobre el agregado. En este instante también fue incorporada la zeolita en las muestras que llevarían un porcentaje según lo dispuesto en el diseño experimental (Ver Figura 4.3).



Figura 4.3 – (Izq.) contenedores de aluminio para calentado en horno de muestras de 1100 g. de árido. (Centro) Vista del interior del bol de mezclado en donde se aprecian los materiales constituyentes previo al proceso de mezclado. (Der.) Mezcla asfáltica sin compactar.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

La masa de zeolita incorporada estaba constituida por un 50% en tamaño 0,15 mm (N°100), un 40% en tamaño 0,75 mm (N°200) y un 10% de tamaño menor a 0,075 mm (bajo N°200). A su vez, para no alterar significativamente el peso específico del árido combinado, la zeolita reemplazó en peso equivalente al árido cuyo tamaño coincide con la zeolita incorporada en cada mezcla; así, para una probeta de 1100 g y 0,3% de zeolita, se extrajeron 3,3 g de árido en los tamaños y porcentajes indicados, y se incorporó 3,3 g de zeolita. Debido a que la zeolita utilizada presenta una densidad similar al árido utilizado, el reemplazo parcial de árido fino se realizó en peso.

El proceso de mezclado se llevó a cabo en forma manual mediante espátula durante un tiempo de 5 minutos para todas las mezclas.

4.2.1.2 Compactación de probetas

Previo a la compactación de las muestras, se prepararon los moldes a utilizar y el martillo Marshall limpiando completamente el conjunto del molde y cara del martillo de compactación y calentándolos en horno y placa caliente a una temperatura próxima a la de compactación. Antes de vaciar las muestras en su respectivo molde de 4" de diámetro, estos eran suavizados en su parte interior con aceite grueso al igual que la cara del martillo. Luego se ajustaba el conjunto collar, molde y base en el pedestal del compactador (Ver Figura 4.4).

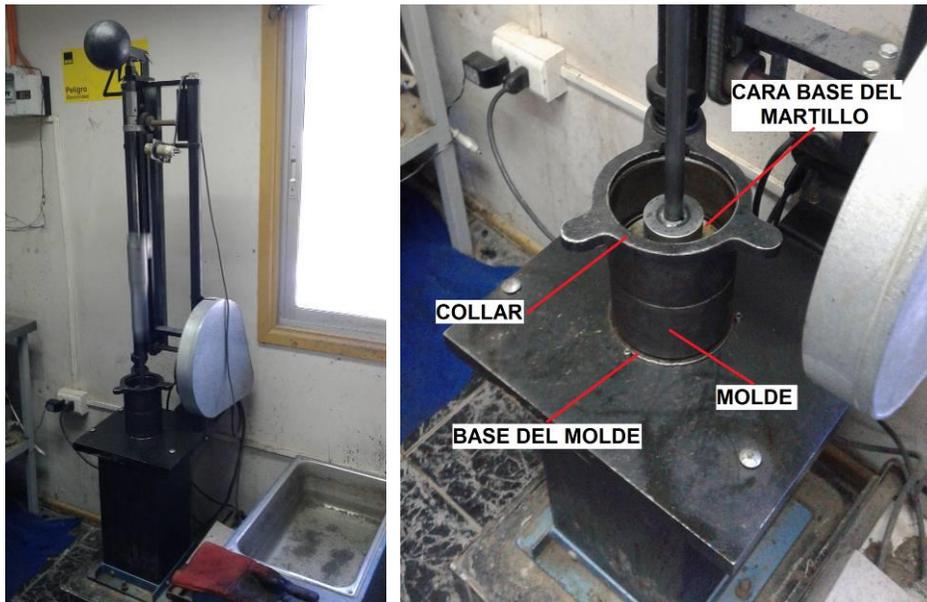


Figura 4.4 – (Izq.) Compactador automático de impacto (martillo Marshall) con base estacionaria para moldes de 4". (Der.) Detalle del conjunto collar, molde y base. También se aprecia dentro del molde la base donde impacta el martillo y compacta la mezcla.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Luego de lo anterior se realizaba el llenado del molde con una espátula, acomodando la mezcla 15 veces en el perímetro y 10 veces en el centro.

Con el martillo de compactación se aplicaron 75 golpes, en un tiempo no superior a 90 s, aplicando en la otra cara el mismo número de golpes en un tiempo no mayor al indicado. Después de compactar, la base del molde era retirada y la probeta se dejaba enfriar al aire durante aproximadamente 12 horas para luego ser extraída del molde y determinado su espesor.

En la Figura 4.5 se observa una muestra de mezcla asfáltica dentro del molde de compactación, una serie de probetas compactadas aún en sus moldes y la extracción de una probeta.



Figura 4.5 – (Izq.) Muestra de mezcla asfáltica dentro del molde de compactación. (Centro) Algunas probetas compactadas en proceso de enfriamiento. (Der.) Herramienta hidráulica para extracción de probetas de moldes.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

En el caso de las probetas que serían utilizadas para el ensaye de estabilidad y fluencia, las probetas fueron extraídas de sus moldes y secadas en horno a $50 \pm 5^\circ \text{C}$ durante aproximadamente 12 horas hasta masa constante. Por su parte, las probetas que serían utilizadas para el ensaye de tracción indirecta, se curaron en un horno de aire forzado por 72 horas a 40°C .

4.3 Densidades de probetas compactadas

Tan pronto como las probetas compactadas se enfriaron a temperatura ambiente luego del proceso de secado o curado, se procedió a determinar su densidad de acuerdo al método descrito en el numeral 8.302.38 del Manual de Carreteras, Volumen 8 (Apéndice 1). Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas en que se considera el volumen macizo de la probeta, mas el volumen de los poros accesibles e inaccesibles.

El procedimiento consiste en determinar la masa de la probeta por pesada al aire ambiente en condiciones seca y saturada superficialmente seca. El volumen se determina por diferencia entre pesadas al aire ambiente y sumergida en agua. En la Figura 4.6 se observa la determinación de la masa para los tres casos mencionados anteriormente mediante pesaje de la probeta en balanza digital.



Figura 4.6 – (Izq.) Pesaje de probeta en seco. (Centro) Pesaje de probeta sumergida en agua. (Der.) Pesaje de probeta en estado saturado superficialmente seco.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

Para el pesaje en seco, las probetas fueron secadas hasta masa constante y luego enfriadas hasta temperatura ambiente ($25 \pm 1^\circ\text{C}$). Para la determinación de masa sumergida las probetas se disponían en un baño de agua a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ por 3 a 5 minutos. Finalmente, la probeta era retirada del agua y secada con una toalla húmeda para registrar la masa en estado saturado superficialmente seco.

Las formulas respectivas para el cálculo de la densidad real de las mezclas asfálticas ensayadas se encuentra en Apéndice 1.

4.4 Medición de estabilidad y fluencia

El ensaye realizado para determinar la estabilidad y fluencia de las mezclas asfálticas compactadas se llevo a cabo de acuerdo al procedimiento descrito en el volumen 8 del Manual de Carreteras, numeral 8.302.40 (Apéndice 3). Este método describe la medición de la resistencia a la deformación plástica de probetas cilíndricas de mezclas asfálticas, cargadas sobre su manto lateral, usando el aparato Marshall. El Método 8.302.40 es una adaptación de la Norma AASHTO T 245 – 82.

En la Figura 4.7 se muestra el equipo básico utilizado para la realización del ensaye, consistente en un baño de agua y la máquina Marshall.



Figura 4.7 – Equipo utilizado para el ensaye Marshall. Se observa a la izquierda el Baño de agua y a la derecha la máquina Marshall de aplicación de carga con indicador análogo de estabilidad y fluencia.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Antes del ensaye, las probetas se colocaron en un baño de agua a $60 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 30 a 40 minutos. A su vez se acondicionó la mordaza de la máquina Marshall limpiándola completamente y llevándola a una temperatura de 38°C en horno y manteniéndola en un rango de 21 y 38°C durante el ensaye. Luego del período de acondicionamiento en agua de las probetas, estas eran extraídas del baño de agua y secadas en la superficie para ser colocadas en la mordaza e iniciar el ensaye.

Previo al montaje de la probeta, la mordaza era lubricada en sus barras guías con una película delgada de aceite de modo que la parte superior de la mordaza deslizara suavemente. En la Figura 4.8 se aprecia el montaje de la probeta en el cabezal de ruptura o mordaza Marshall.



Figura 4.8 – (Izq.) Mordaza desmontada para su lubricación y disposición de la probeta de ensaye. (Der.) Probeta de mezcla asfáltica montada en el cabezal de ruptura Marshall.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Una vez dispuesta la probeta en la mordaza, se aplicó carga a una velocidad constante de deformación de 50 ± 1 mm/min, hasta que se produjera la falla.

El punto de falla queda definido por la carga máxima obtenida y se define la estabilidad Marshall como el número total de newtons (N) necesarios para producir la falla de la probeta a 60°C .

A su vez, al momento de producirse la falla de la probeta también se registró la medición del dial indicador de la fluidez de la probeta expresada en unidades de 0,25 mm (1/100 pulg.).

El procedimiento completo de medición de estabilidad y fluencia, comenzando desde el momento en que se retira la probeta del agua, no debe durar más de 30 s. En la Figura 4.9 se muestra el ensayo de una probeta.

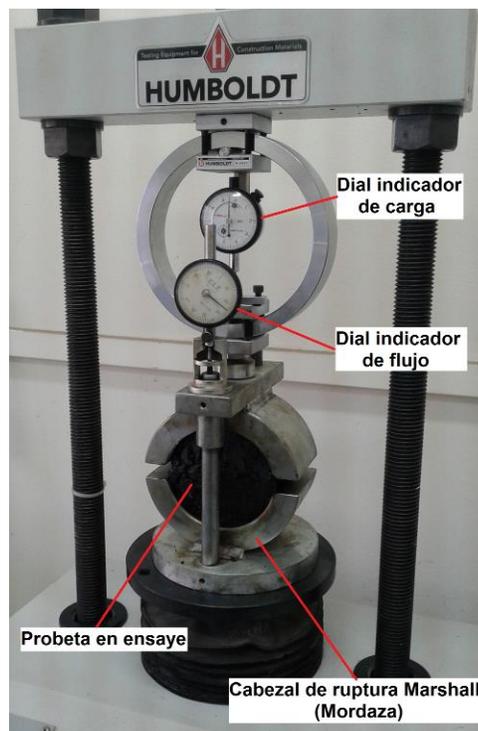


Figura 4.9 – Medición de estabilidad y fluencia a una probeta mediante la máquina Marshall.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.5 Ensaye de tracción indirecta (ITS)

Para este ensaye se fabricaron seis probetas de 4" de diámetro, para cada mezcla a ensayar, como se describió anteriormente en la sección 4.2.1.

El procedimiento seguido en la realización de este ensaye se ajustó a las indicaciones del Manual de Carreteras, Volumen 5 y numeral 5.413.205(2), (Apéndice 4).

Las probetas se desmoldaron después de 24 horas de fabricadas. Luego se dispusieron sobre una bandeja plana y lisa y se curaron en un horno de aire forzado por 72 horas a 40°C, como se aprecia en la Figura 4.10.



Figura 4.10 – (Izq.) Horno de aire forzado utilizado para curar las probetas. (Der.) Vista interior del Horno de aire forzado.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Después del proceso de curado y de enfriar las probetas a temperatura ambiente, se determinó la densidad de cada probeta mediante medida geométrica según el método 8.302.38 del Manual de Carreteras (Apéndice 1), descrito en la sección 4.3 de este capítulo.

A continuación tres de las probetas de cada tipo de mezcla asfáltica fueron ensayadas a tracción indirecta (ITS) en condición seca y tres en condición saturada.

El ensaye de ITS consiste en aplicar carga a las probetas a una velocidad de deformación de 50,8 mm/min sobre su eje diametral utilizando el cabezal de ruptura Lottman, hasta provocar la ruptura de la probeta. La falla debe provocarse en el eje axial de la probeta.

Para el ensaye en condición seca, las probetas fueron ambientadas previamente en horno de aire forzado a 25 ± 1 °C por un período de 1 hora. Para el ensaye en condición saturada, las probetas fueron dispuestas en un baño de agua a 25 ± 1 °C por 24 horas y al momento de ser ensayadas se secaban en su superficie de modo de llevarlas a condición saturada superficialmente seca.

Luego de los procesos de acondicionamiento de las probetas para el ensaye en condición seca y saturada, se colocaba la probeta a ensayar en el cabezal de ruptura de tal forma que la carga fuera aplicada en el plano diametral de la misma. En la Figura 4.11 se muestra el cabezal de ruptura junto con una probeta de mezcla asfáltica dispuesta para recibir carga en un plano axial.



Figura 4.11 – Vista lateral, superior y frontal del cabezal de ruptura utilizado en el ensaye de tracción indirecta. Se observa la disposición de la probeta para recibir carga en un plano axial.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

Una vez colocada la probeta en la máquina Marshall, se procedía con el ensaye aplicando carga a la probeta a una velocidad de 50,8 mm./min. hasta conseguir la máxima carga (falla en el eje axial de la probeta).

Las formulas respectivas para la obtención de la resistencia a tracción indirecta, mediante el valor de carga resistida en newtons (N), y resistencia a tracción retenida, se adjuntan en Apéndice 4.

4.6 Ensayes preliminares

4.6.1 Contenido de humedad en la zeolita

Como un ensaye preliminar exploratorio se determinó el contenido de agua de la zeolita y se evaluó la variación del contenido de humedad en el tiempo, a temperatura constante. Para ello se sometieron a deshidratación en horno a una temperatura de 110 °C muestras de 20 g de zeolita y se midieron las pérdidas de peso en el tiempo a intervalos regulares. En la Figura 4.12 se muestra el equipo utilizado.



Figura 4.12 – (Izq.) Horno utilizado para deshidratación de muestras. (Der.) Pesaje en balanza de precisión de las muestras de zeolita.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Dicha experiencia entregó información acerca de la forma en que la zeolita libera el agua contenida en su estructura y con ello se estimó su comportamiento en la etapa de mezclado con el asfalto. Los resultados se muestran en la Figura 4.13.

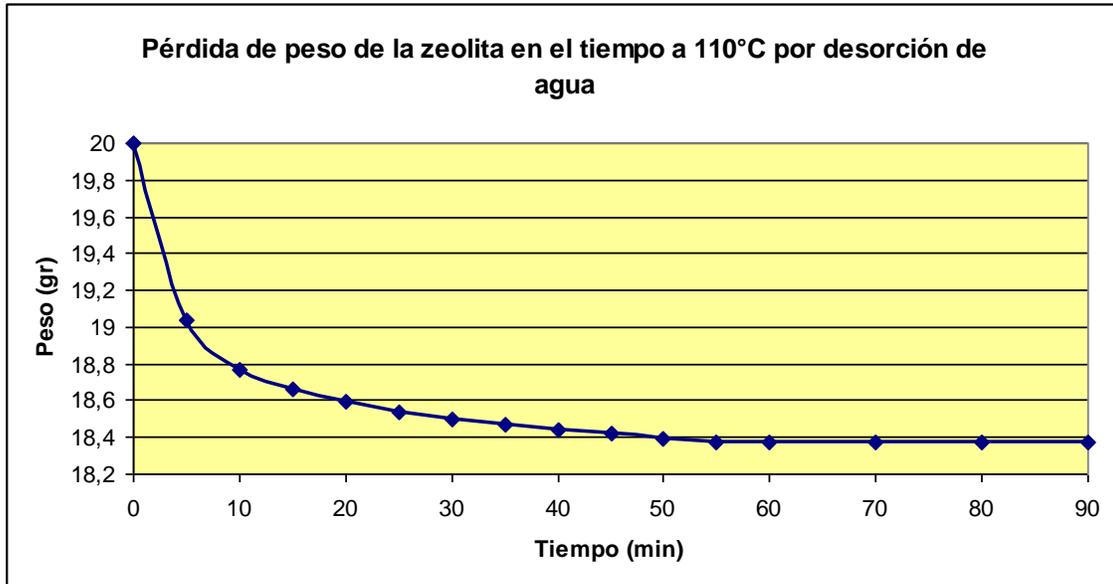


Figura 4.13 – Pérdida de peso de la zeolita tamaño 0,15 mm en el tiempo a temperatura constante.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

Si bien este tipo de zeolita de clasificación clinoptilolita puede almacenar en su estructura entre un 6% a un 12% de agua de cristalización, la zeolita analizada contenía 8,9% de agua en su estructura al momento del ensaye, que corresponde a 1,63 g de agua en la muestra de 20 g de zeolita. El proceso de deshidratación presentado en el gráfico de la Figura 4.13, nos muestra que la zeolita libera rápidamente el agua contenida llegando a registrarse masa constante luego de 55 minutos de comenzado el ensaye. Los datos recopilados nos indican que la zeolita en estudio perdió cerca de un 59,3 % de su humedad inicial durante los primeros 5 minutos expuesta a 110 °C, y un 90% a los 25 minutos.

Así, teniendo en cuenta la acelerada liberación de agua que experimenta la zeolita al ser calentada a 110 °C, es posible estimar que para las dosis de zeolita que son incorporadas a las mezclas asfálticas (3,3 a 11 gr. para las probetas de 1100 gr. de árido), está podría aportar como máximo entre 0,2 y 0,5 cm³ de agua, durante los primeros 5 minutos en la etapa de mezclado de los áridos y el asfalto.

Para determinar si otras temperaturas producían efectos diferentes en la forma en que la zeolita libera el agua de su estructura, se dispusieron muestras de zeolita a deshidratación en horno a 135 °C y 165° C. Los resultados no mostraron variaciones significativas por lo que se concluye que vasta con exponer a la zeolita a una temperatura de 110° C para producir el efecto de pérdida de humedad en la forma mostrada en la Figura 4.13. Los datos de las mediciones efectuadas a las muestras que se sometieron a deshidratación a otras temperaturas se muestran en Anexos A1

También se evaluó la adsorción de humedad de la zeolita tamaño 0,15 mm en el tiempo a temperaturas entre 18 °C y 22 °C. Para ello se dejaron muestras deshidratadas en ambiente de laboratorio hasta que alcanzaran el equilibrio adsorbiendo nuevamente la humedad perdida. En el gráfico de la Figura 4.14 se presentan estos resultados. En este caso se determinó que el mineral adsorbe durante los 90 minutos iniciales, mas de la mitad (58,4%) del agua perdida, para finalmente alcanzar la humedad de equilibrio después de 4 horas, en donde las diferencias de peso registradas entre pesadas sucesivas eran menores a 0,1% de la menor masa determinada. Los datos de las mediciones efectuadas a las muestras que se sometieron a hidratación en ambiente de laboratorio se muestran en Anexos A2.

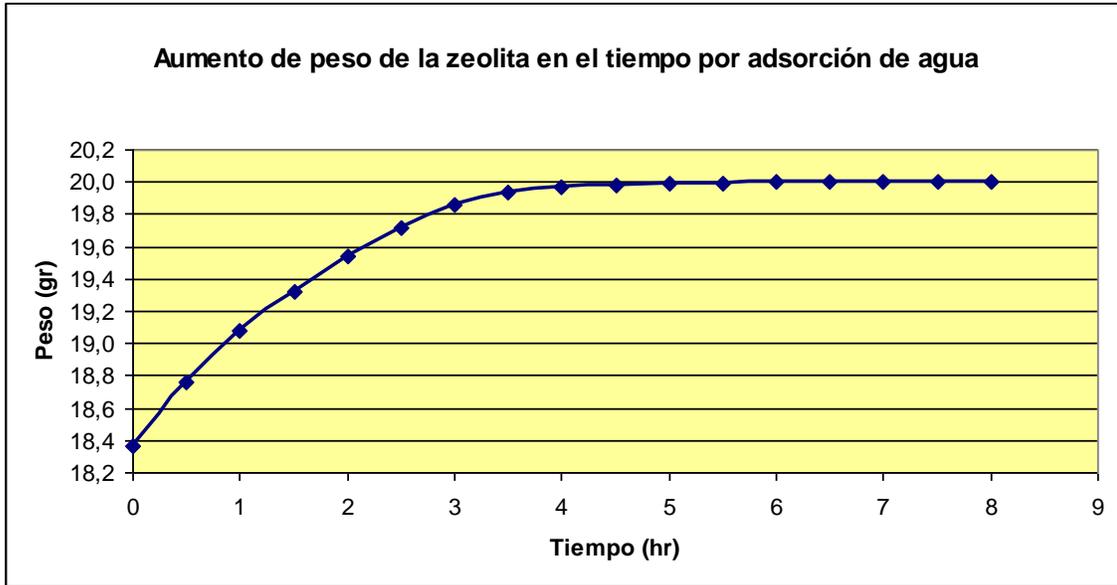


Figura 4.14 – Adsorción de humedad de la zeolita tamaño 0,15 mm en el tiempo.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.6.2 Granulometría de los Áridos

La determinación de la granulometría de los áridos minerales se realizó de acuerdo a los procedimientos 8.202.2 y 8.202.3 del Manual de Carreteras, volumen 8.

Los áridos utilizados en la presente investigación proceden del río Aconcagua y poseen la granulometría que se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 – Áridos utilizados y sus granulometrías.

Tamiz		Gravilla 11/16	Gravilla 6/11	Polvo Roca 0/5
mm	ASTM	% Pasa		
19	[3/4"]	100		
12.5	[1/2"]	27	100	
9.5	[3/8"]	1	78	100
4.75	[N°4]	1	5	92
2.36	[N°8]	1	2	63
1.18	[N°16]	1	2	41
0.6	[N°30]	1	2	30
0.3	[N°50]	1	1	21
0.15	[N°100]	1	1	15
0.075	[N°200]	1	1	11

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Consiguientemente, dadas las características de los áridos, estos fueron mezclados como se indica en la Tabla 4.6 para cumplir con la banda granulométrica IV - A - 12 correspondiente a una granulometría semidensa.

Tabla 4.6 – Áridos utilizados y sus granulometrías.

Material	Porcentaje en la mezcla
Gravilla 11/16	20
Gravilla 6/11	26
Polvo Roca 0/5	54

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Finalmente la Tabla 4.7 y Figura 4.15 se detallan la granulometría de los áridos combinados que cumple con las especificaciones del Manual de Carreteras (MC) 5.408.201.F relativas a los límites de la banda granulométrica IV - A - 12.

Tabla 4.7 – Granulometría de los áridos mezclados.

Tamiz		% Que Pasa	Banda Específica IV-A-12	
mm	ASTM			
19	[3/4"]	100	100	100
12.5	[1/2"]	85	80	95
9.5	[3/8"]	74	70	85
4.75	[N°4]	51	43	58
2.36	[N°8]	35	28	42
1.18	[N°16]	23	-	-
0.6	[N°30]	17	13	24
0.3	[N°50]	12	8	17
0.15	[N°100]	9	6	12
0.075	[N°200]	6	4	8

Fuente: Elaboración propia, 2017.

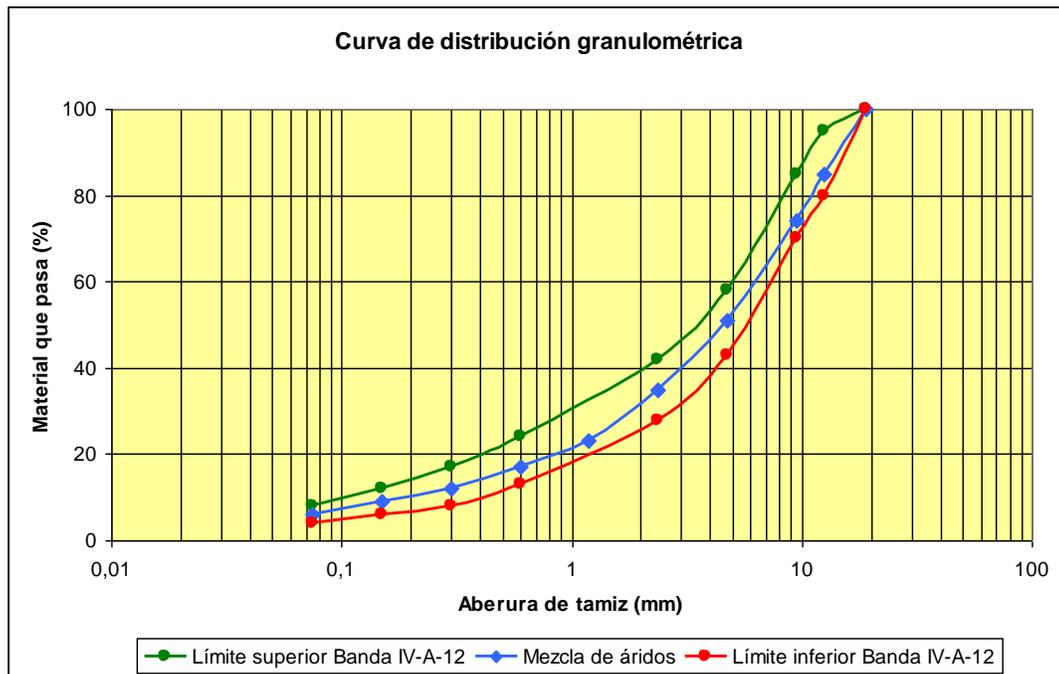


Figura 4.15 – Curva de distribución granulométrica de los áridos combinados.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.7 Diseño de la mezcla patrón (MAC Patrón)

Como se detalló en el capítulo 3, correspondiente al diseño experimental, se confeccionó una mezcla asfáltica caliente (MAC) denominada “MAC Patrón”, mediante el método Marshall, siguiendo las indicaciones del Manual de Carreteras en su numeral 8.302.47. Esta mezcla se fabricó con el fin de servir como parámetro evaluador para comparar el desempeño de las mezclas con incorporación de zeolita, ya que esta mezcla asfáltica se produjo a las temperaturas convencionales de mezclas en caliente según la normativa chilena.

Las temperaturas de mezclado y compactación fueron de 165° C y 150° C, respectivamente. El resumen de los parámetros evaluados en el diseño Marshall de esta mezcla se presentan en la Tabla 4.8, en donde se muestran los valores de densidad, estabilidad, fluencia, porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM), porcentaje de huecos de aire (Va) y porcentajes de huecos llenos de asfalto, para los diversos contenidos de asfalto evaluados. Los valores de cada una de las mediciones realizadas a las probetas confeccionadas en relación al diseño Marshall de esta mezcla, se encuentran en Anexos B1 al B3.

Tabla 4.8 – Propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia del la mezcla MAC Patrón.

ASFALTO (%)	DENSIDAD (kg/m ³)	ESTABILIDAD (KN)	FLUENCIA (0,25 mm)	VAM (%)	Va (%)	V _{LL} (%)
4,0	2306,9	14,73	10,0	15,81	7,76	50,95
4,5	2317,9	15,04	10,8	15,82	6,67	57,82
5,0	2333,3	15,41	11,0	15,66	5,41	65,47
5,5	2354,6	15,08	12,0	15,29	3,91	74,47
6,0	2338,4	14,31	12,2	16,27	3,93	75,83

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En los datos presentados en la tabla anterior se puede apreciar que para los materiales utilizados y la granulometría presentada, el porcentaje de asfalto para máxima densidad corresponde a un 5,5% y para máxima estabilidad a un 5%. A su vez, los cálculos respectivos indican que para un 5% de huecos de aire el porcentaje de asfalto debe ser 5,1%.

Consecuentemente, al ponderar los tres porcentajes de asfalto mencionados anteriormente, el porcentaje óptimo de asfalto resultante del diseño de la mezcla patrón es 5,2%.

En los gráficos siguientes (Figuras 4.16, 4.17 y 4.18) se muestran los valores de cada parámetro evaluado en el diseño de la mezcla patrón. En ellos se aprecia claramente los porcentajes de asfalto que maximizan la densidad y estabilidad junto con el porcentaje de asfalto que permite obtener una mezcla con un 5% de huecos de aire.

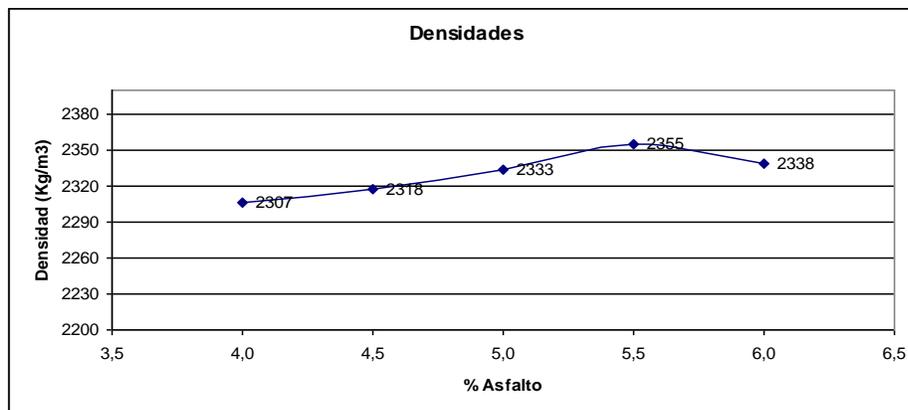


Figura 4.16 – Valores de la densidad para los diversos porcentajes de asfalto evaluados en el diseño Marshall de la mezcla patrón (MAC Patrón).

Fuente: Elaboración propia, 2017.

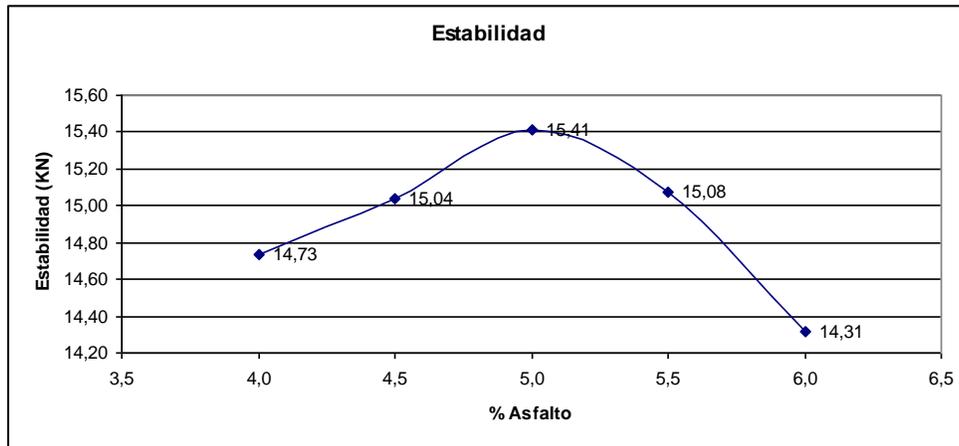


Figura 4.17 – Valores de Estabilidad para los diversos porcentajes de asfalto evaluados en el diseño Marshall de la mezcla patrón (MAC Patrón).
Fuente: Elaboración propia, 2017.

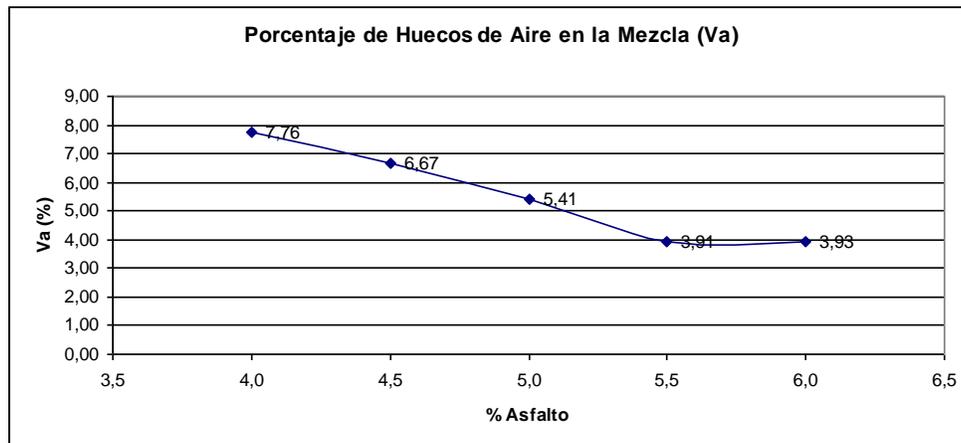


Figura 4.18 – Porcentajes de huecos de aire para los diversos porcentajes de asfalto evaluados en el diseño Marshall de la mezcla patrón (MAC Patrón).
Fuente: Elaboración propia, 2017.

También se adjuntan los gráficos correspondientes a la Fluencia, Porcentaje de vacíos en el agregado mineral y Porcentaje de Huecos llenos de asfalto en las Figuras 4.19, 4.20 y 4.21, respectivamente. Se observa que, al igual que en los gráficos anteriores, las curvas muestran las tendencias habituales en el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente al ser evaluadas en contenidos crecientes de asfalto.

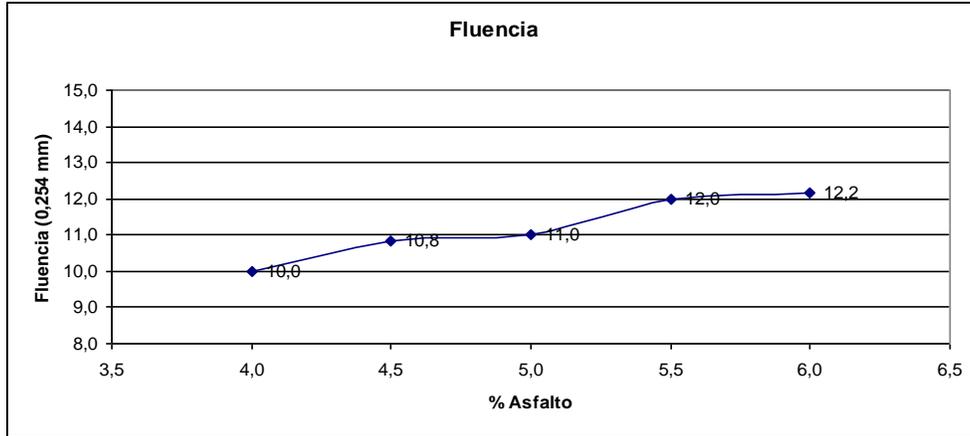


Figura 4.19 – Valores de fluencia para los diversos porcentajes de asfalto evaluados en el diseño Marshall de la mezcla patrón (MAC Patrón).
Fuente: Elaboración propia, 2017.

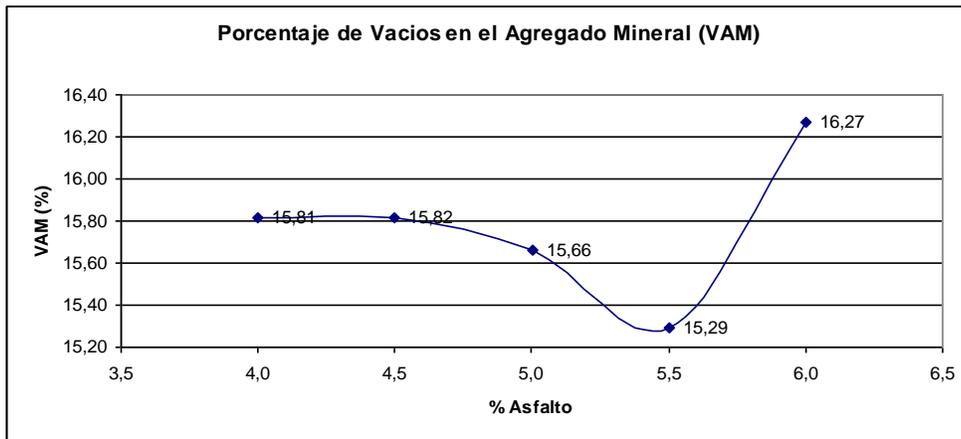


Figura 4.20 – Porcentajes de vacios en el agregado mineral para los diversos porcentajes de asfalto evaluados en el diseño Marshall de la mezcla patrón (MAC Patrón).
Fuente: Elaboración propia, 2017.

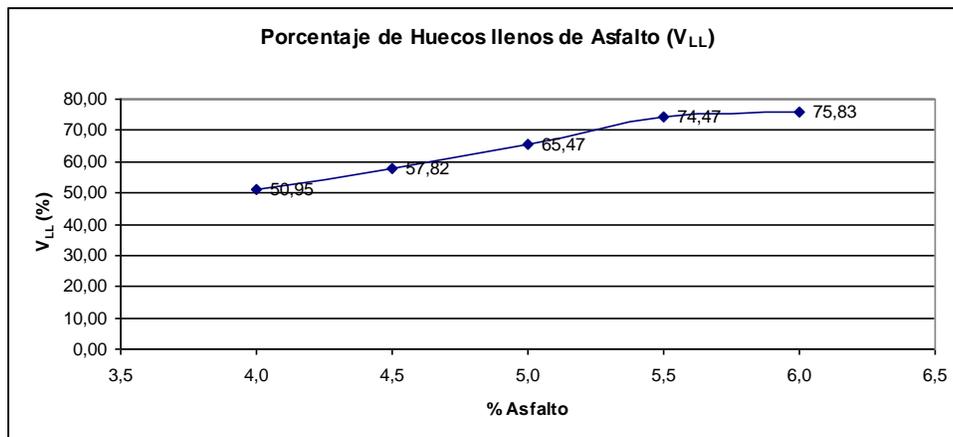


Figura 4.21 – Porcentajes de huecos llenos de asfalto para los diversos porcentajes de asfalto evaluados en el diseño Marshall de la mezcla patrón (MAC Patrón).
Fuente: Elaboración propia, 2017.

5. Presentación y análisis de resultados

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en los ensayos y procedimientos realizados en las dos etapas de la actividad experimental según se definió en los capítulos 3 y 4, referentes a la incorporación de zeolita natural chilena (en adelante “zeolita”) a mezclas asfálticas. Conjuntamente con la presentación numérica de resultados mediante gráficas y tablas, se realizan algunos comentarios relacionados con los resultados obtenidos proponiendo a su vez posibles explicaciones para los comportamientos observados.

Adicionalmente se incorpora en la parte final de este capítulo, una sección destinada a correlacionar los resultados obtenidos con el comportamiento teórico que se puede esperar en las mezclas de acuerdo a los resultados recopilados en laboratorio y tomando como referencia la experiencia y resultados que indica la bibliografía relacionada con el comportamiento de las mezclas asfálticas.

5.1 Diseño y resultados de la mezcla en caliente con incorporación de 0,3% de zeolita (MAC 0,3%)

Con el fin de evaluar la influencia de la zeolita en las propiedades que determinan la obtención del contenido óptimo de asfalto para la mezcla, se fabricaron probetas con porcentajes crecientes de asfalto y una dosis de 0,3% de zeolita con respecto al peso del agregado pétreo. Las temperaturas de mezclado y compactación fueron de 165 °C y 150 °C, respectivamente. A esta mezcla en caliente con adición de zeolita se le denominó “MAC 0,3%”.

La masa de zeolita incorporada estaba constituida por un 50% en tamaño 0,15 mm (N°100), un 40% en tamaño 0,075 mm (N°200) y un 10% de tamaño menor a 0,075 mm (bajo N°200). A su vez, para no alterar significativamente el peso específico del árido combinado, la zeolita reemplazó en peso equivalente al árido cuyo tamaño coincide con la zeolita incorporada; así, para las probetas de 1100 g y 0,3% de zeolita, se extrajeron 3,3 g de árido en los tamaños y porcentajes indicados anteriormente, y se incorporó 3,3 g de zeolita. Dado que la zeolita utilizada presenta una densidad similar al árido utilizado, el reemplazo parcial de árido fino se realizó en peso. Cabe señalar, que la zeolita fue incorporada a la mezcla en la etapa de mezclado siendo agregada al resto de los áridos en conjunto con el asfalto.

Los valores de cada una de las mediciones realizadas a las probetas confeccionadas en relación al diseño Marshall, se encuentran en Anexos B4 al B6. En la Tabla 5.1 se muestra un resumen de los valores de las propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia obtenidos en el diseño Marshall de la MAC 0,3%.

Tabla 5.1 – Propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia del la mezcla MAC 0,3%.

ASFALTO (%)	DENSIDAD (kg/m ³)	ESTABILIDAD (KN)	FLUENCIA (0,25 mm)	VAM (%)	V _a (%)	V _{LL} (%)
4,0	2313,0	15,13	11,7	15,59	7,51	51,82
4,5	2330,0	16,62	11,8	15,37	6,18	59,79
5,0	2358,8	17,87	13,0	14,74	4,37	70,33
5,5	2360,2	16,90	12,7	15,09	3,67	75,65
6,0	2349,2	15,19	12,5	15,88	3,49	78,06

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En los datos presentados en la tabla anterior se puede apreciar que para los materiales utilizados y la granulometría disponible, el porcentaje de asfalto para máxima densidad corresponde a un 5,5% y para máxima estabilidad a un 5%. A su vez, los cálculos respectivos indican que para un 5% de huecos de aire el porcentaje de asfalto debe ser 4,6%.

Consecuentemente, al ponderar los tres porcentajes de asfalto mencionados anteriormente, el porcentaje óptimo de asfalto para la MAC 0,3% corresponde a 5% de asfalto.

Según lo anterior y recordando que el diseño de la mezcla patrón sin zeolita obtuvo un porcentaje óptimo de asfalto de 5,2 %, podemos ver que la incorporación de zeolita a la mezcla produjo una reducción de un 0,2% en el contenido óptimo de asfalto. Esta reducción obviamente se relaciona con los valores de la densidad y estabilidad obtenidos por la mezcla con zeolita que fueron sustancialmente mayores a los obtenidos por la mezcla patrón.

A continuación analizaremos los resultados obtenidos en las propiedades volumétricas, resistencia a deformación plástica (estabilidad) y fluencia de esta mezcla a raíz de la incorporación de zeolita en dosis de 0,3%. Para constatar las diferencias estadísticamente significativas consultar Anexos C1 al C10, en donde se presentan estadísticos descriptivos de los valores obtenidos de las probetas ensayadas y análisis de varianza entre grupos de comparación. En la Tabla 5.2 se muestran los requisitos para mezclas asfálticas en caliente estipulados en el Manual de Carreteras, volumen 5.

Tabla 5.2 – Requisitos para mezclas asfálticas en caliente.

TIPO DE MEZCLA ASFALTICA	ESTABILIDAD (N)	FLUENCIA (0,25 mm)		HUECOS EN LA MEZCLA (%)	
	Mín.	Mín.	Max.	Mín.	Max.
Rodadura	9.000	8	16	4,0	6,0
Intermedia	8.000	8	16	3,0	8,0
Base Gruesa	6.000	8	16	5,0	10,0
Superficie Fina	4.000	8	16	3,0	8,0

Fuente: Manual de Carreteras, volumen 5, edición 2016.

En los valores de la densidad (Figura 5.1), se observa que para un 4% de contenido asfáltico la MAC Patrón y la Mezcla 0,3% presentaron densidades muy similares, mientras que para contenidos asfálticos superiores a 4% la mezcla con zeolita obtiene mayor densidad. De hecho el análisis de varianza nos indica que sólo para el 6% de contenido asfáltico no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de ambas mezclas.

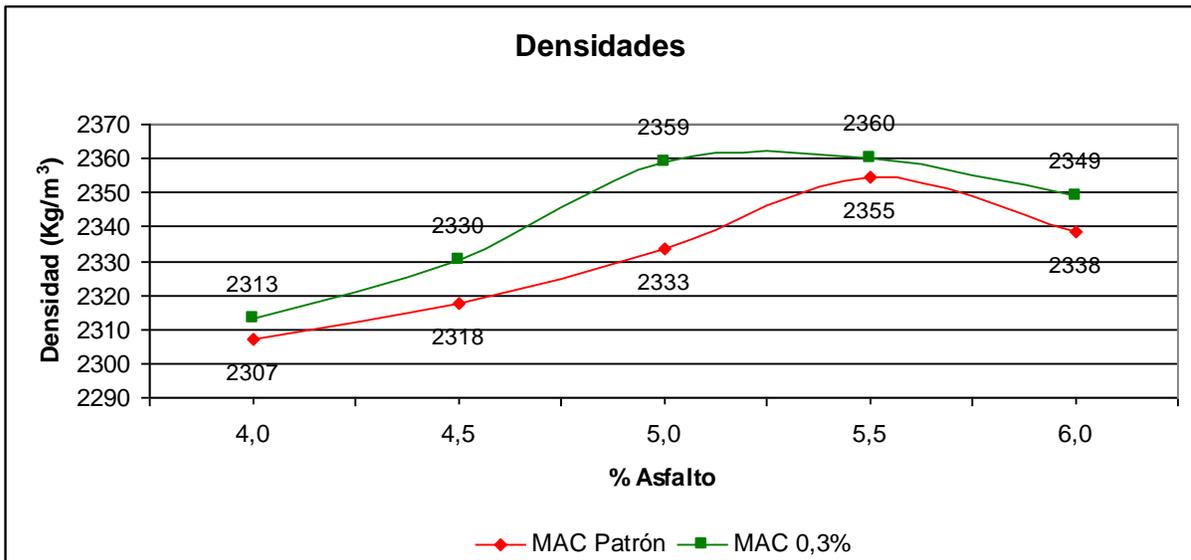


Figura 5.1 – Densidades MAC Patrón y MAC 0,3%.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Si bien el proceso de compactación es de gran influencia en la densidad que se obtiene en una mezcla asfáltica, un buen recubrimiento de asfalto en el agregado pétreo influye también en el acomodo adecuado de las partículas de agregado. En este caso podemos inferir que el micro

espumado producido por el agua contenida en la zeolita, propició un aumento del volumen del asfalto de tal manera que la trabajabilidad de la mezcla mejoró dando como resultado un mejor reacomodo de las partículas de árido ante los golpes del martillo compactador.

Es interesante notar que aunque ambas mezclas presentaron la máxima densidad en el contenido asfáltico de 5,5%, en el caso de la mezcla con zeolita se obtuvo prácticamente el mismo valor de la máxima densidad en el contenido asfáltico inmediatamente inferior en donde además se produjo la mayor diferencia entre ambas mezclas. Así, las diferencias porcentuales entre la densidad de ambas mezclas indican que para el contenido asfáltico de 5%, que corresponde al porcentaje óptimo de asfalto, la mezcla con zeolita incrementó su densidad en un 1,1% con respecto a la mezcla patrón. Este porcentaje de aumento en la densidad, si bien pudiera parecer muy pequeño, es significativo pues, como veremos mas adelante, éste aumento en la densidad produjo una disminución de un 1% en los huecos de aire de la mezcla con zeolita que según algunos estudios [34,36,38] es suficiente para causar efectos en la fatiga y deformación que podría experimentar la mezcla asfáltica. Por otro lado, debido a las características granulométricas y contenido asfáltico de la mezcla en este tramo, no es conveniente incrementar la densidad mas allá de un 2,1% pues en este caso se obtendría un valor de vacíos en el agregado mineral inferior al 14% estipulado como el mínimo admisible según la normativa chilena.

Podemos deducir entonces que la incorporación de zeolita a una mezcla asfáltica en caliente ayudaría en el proceso de compactación al lograr mejores densidades que una mezcla en caliente tradicional que no posea algún tipo de aditivo o adición.

También podríamos esperar, a raíz de los resultados obtenidos, que una dosis adecuada de zeolita que aumente las densidades, podría disminuir la energía requerida en el proceso de compactación en donde probablemente se necesitarían menos golpes del martillo compactador para obtener las mismas densidades mostradas por la mezcla patrón sin zeolita.

Seguidamente, expondremos los resultados correspondientes a vacíos en el agregado mineral (VAM), huecos de aire (V_a) y huecos llenos de asfalto (V_{LL}). Como podremos ver, estos resultados se corresponden con los valores obtenidos de la densidad. El análisis estadístico realizado a los valores que se obtuvieron en cada propiedad volumétrica y agrupados según mezcla y cantidad de asfalto incorporado, muestra diferencias estadísticamente significativas para todos los contenidos asfálticos evaluados, excepto en 6%, en donde también los valores de la densidad no muestran diferencias estadísticamente significativas.

Cabe recordar también que, según indica la normativa vigente [20], el VAM y el V_a son porcentajes referidos al volumen total de una probeta asfáltica compactada. Por su parte, el V_{LL} corresponde a un porcentaje del VAM.

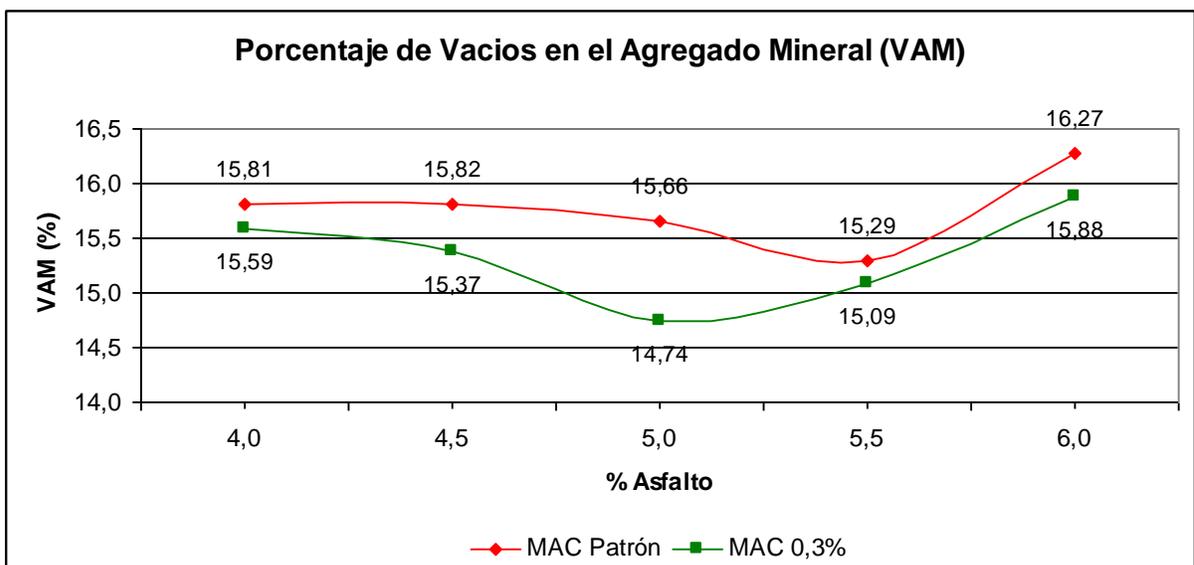


Figura 5.2 – Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral MAC Patrón y MAC 0,3%.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

Dos variables que influyen en el cálculo de vacíos en el agregado mineral, son el porcentaje de asfalto incorporado y la densidad de la mezcla compactada (ver fórmula en Apéndice 2, numeral 4.6), y como ya hemos establecido anteriormente, la incorporación de zeolita causa efectos en el volumen del asfalto durante el proceso de mezclado y produce densidades más altas que la mezcla sin zeolita. Consecuentemente, el uso de zeolita en la mezcla asfáltica producirá también efectos en el porcentaje de vacíos en el agregado mineral, entendiendo a este como los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado de una mezcla compactada, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

En el gráfico de la Figura 5.2 se presentan los valores obtenidos en cuanto al porcentaje de vacíos en el agregado mineral para la MAC Patrón y la MAC 0,3%. La normativa chilena [16] indica que el porcentaje de VAM, para mezclas con árido pétreo de tamaño nominal igual a 20 mm, debe ser como mínimo 14% y se puede distinguir que ambas mezclas presentaron valores por sobre el mínimo exigido. Sin embargo, para todos los contenidos asfálticos evaluados, la mezcla con zeolita presenta menos vacíos en el agregado mineral que la mezcla patrón, mostrándose como una mezcla más compacta.

Los valores de VAM obtenidos por la mezcla con zeolita, suponen un menor espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y los huecos de aire, en relación a la mezcla patrón. No obstante, dado que los valores de VAM superan el 14% exigido, se puede prever que el espacio disponible entre las partículas de árido es suficiente para el acomodo de películas de asfalto lo suficientemente gruesas según lo permite el contenido asfáltico incorporado en cada tramo. Esto es avalado por los contenidos de huecos de aire (V_a) logrados por la mezcla con zeolita que también están dentro de los rangos permitidos por la normativa vigente.

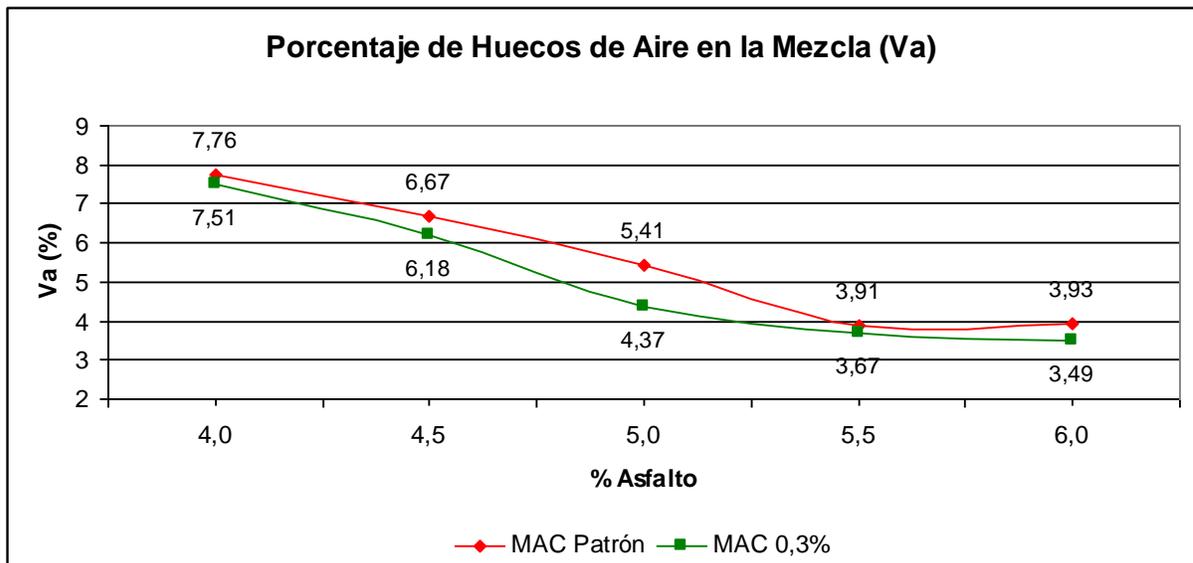


Figura 5.3 – Porcentaje de Huecos de Aire en la Mezcla MAC Patrón y MAC 0,3%.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

Como era previsible, por la menor cantidad de vacíos en el agregado mineral, los contenidos de huecos de aire (V_a) mostrados por la mezcla con zeolita, son menores a los obtenidos por la mezcla patrón en todos los contenidos asfálticos evaluados (ver Figura 5.3). Si bien los valores de huecos de aire son muy similares para ambas mezclas en los contenidos asfálticos de 4% y 5,5%, la baja dispersión de los datos dentro de cada grupo de comparación permite establecer que efectivamente existe diferencia estadísticamente significativa entre el promedio de valores obtenidos en la mezcla patrón y la mezcla con 0,3% de zeolita, para ambos contenidos asfálticos. Por otro lado, la mayor diferencia entre ambas mezclas se observa en el tramo correspondiente al contenido óptimo

de asfalto (5%) en donde se produjo una reducción de 1% en los huecos de aire de la mezcla con zeolita.

Los resultados de estudios recientes [44,46,49] indican claramente que pequeñas variaciones en el contenido de huecos de aire influyen directamente en la fatiga que podría experimentar la mezcla, en la resistencia a la deformación (ahuellamiento) y en la vida útil del pavimento asfáltico. Por lo anterior, es admisible pensar que las variaciones en el contenido de huecos de aire mostradas entre la MAC Patrón y la MAC 0,3% eventualmente afectarían su desempeño al ser utilizadas en un pavimento flexible y podrían esperarse diferencias entre ambas mezclas en el comportamiento y respuesta ante cargas de tránsito. También, dado que para todos los contenidos asfálticos la mezcla con zeolita mostró menor contenido de huecos de aire, podemos decir que la mezcla con zeolita podría presentar menor permeabilidad al ser dispuesta como capa en un pavimento asfáltico.

Según los rangos admisibles de V_a requeridos para las mezclas asfálticas según tipo (ver Tabla 5.2) podemos ver en el gráfico de la Figura 5.5 que para el contenido óptimo de asfalto (5%), la mezcla con zeolita presenta contenido de huecos dentro del rango aceptado para capa de rodadura. Para contenidos asfálticos superiores, la MAC 0,3% obtuvo valores menores de V_a que dejan a la mezcla cumpliendo el requisito correspondiente a capa intermedia o superficie fina. Y para los contenidos asfálticos menores al óptimo (4% y 4,5%) la mezcla con zeolita muestra los valores más altos de V_a lo que sería aceptable para una capa intermedia, base gruesa o superficie fina.

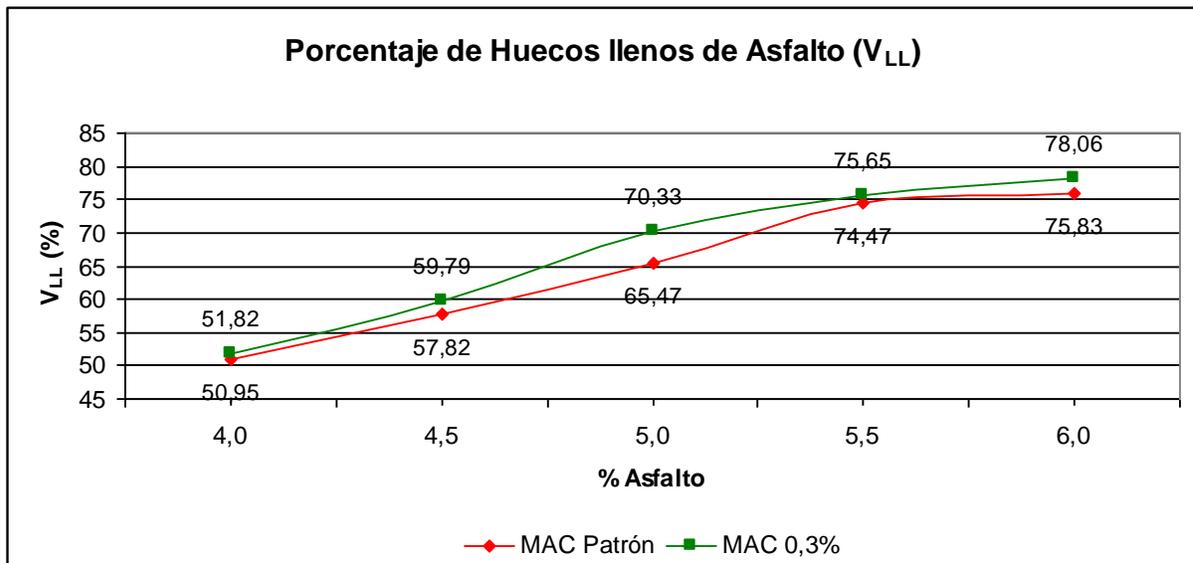


Figura 5.4 – Porcentaje de Huecos llenos de Asfalto MAC Patrón y MAC 0,3%.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Por su parte, en los porcentajes de huecos llenos de asfalto (Figura 5.4), podemos observar un comportamiento en ambas mezclas que se corresponde con los valores de densidad obtenidos por cada una. El hecho que la mezcla con zeolita muestre mayores porcentajes de V_{LL} que la mezcla patrón, para los mismos contenidos asfálticos, se debe obviamente al menor espacio disponible para el acomodo del asfalto como quedó en evidencia al revisar los valores de VAM.

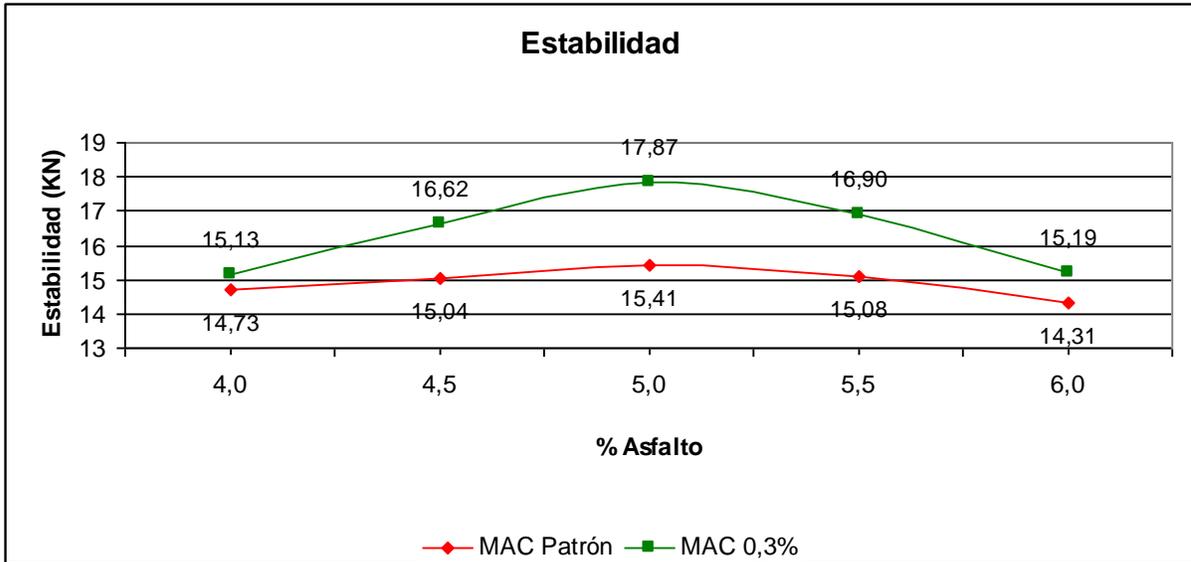


Figura 5.5 – Estabilidades MAC Patrón y MAC 0,3%.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

En cuanto a la estabilidad (Figura 5.5) se aprecia algo similar a lo ocurrido con la densidad pues la mezcla con zeolita presenta estabilidades superiores a las obtenidas por la mezcla sin zeolita.

Para los extremos de las curvas, en donde se ubican los contenidos de 4% y 6% de asfalto, no se distinguen diferencias estadísticamente significativas por lo que para esos contenidos asfálticos, áridos y granulometría utilizada, la cantidad de zeolita incorporada no logra contrarrestar los efectos de agregar una cantidad insuficiente o excesiva de asfalto.

Por lo tanto, podemos inferir que en el contenido de 4% de asfalto, en donde ambas mezclas presentan menor cohesión entre las partículas de árido, el micro espumado producido por la zeolita no logra aumentar el volumen del asfalto en una cantidad suficiente que permita conferir un mayor recubrimiento de partículas. Por otro lado, en el contenido de 6% de asfalto, el efecto expansivo del micro espumado en el asfalto no lograría contrarrestar la pérdida de fricción interna entre las partículas de árido debido a la presencia de películas de asfalto demasiado gruesas. En cualquier caso, queda de manifiesto que el efecto de un 0,3% de zeolita en la estabilidad obtenida por la mezcla, es menos significativo en condiciones en donde se vea afectada la cohesión del árido mineral por contenidos inadecuados de asfalto.

Sin embargo, en el rango de 4,5% a 5,5% de contenido asfáltico, el efecto de la zeolita es mayor y se observan diferencias marcadas en donde la mezcla con zeolita llega a presentar casi 2,5 KN por sobre el valor de estabilidad de la mezcla patrón en el contenido asfáltico de 5%, equivalente a un incremento de 16% en estabilidad. Esto supone una mejora importante introducida por el uso de zeolita en la mezcla en caliente dado que para un mismo contenido asfáltico en ambas mezclas analizadas, la que incorporó zeolita podría tener un mejor comportamiento ante los esfuerzos, presentando una resistencia más alta a los desplazamientos y deformaciones inducidas por cargas de tránsito.

Una explicación razonable para los valores más altos de estabilidad mostrados por la MAC 0,3%, es que el micro espumado de la zeolita en el asfalto permitió una mejor cohesión entre las partículas de árido de tal manera que la mezcla compactada resistió una mayor cantidad de carga antes de empezar a deformarse. El aumento del volumen del asfalto por acción del micro espumado habría permitido en una primera etapa un recubrimiento mayor del árido y luego, al menguar el efecto del agua en el asfalto, el ligante disminuyó su volumen provocándose un efecto similar al aumento de viscosidad que a su vez habría cohesionado en forma más efectiva los áridos que ya estaban recubiertos por una película de asfalto.

Se sabe que la cohesión aumenta hasta cierto punto con aumentos del contenido de asfalto y que cuando se sobrepasa un cierto nivel, el contenido de asfalto produce una película demasiado

gruesa sobre las partículas de agregado, lo que causa una pérdida de fricción entre las partículas de árido. Sin embargo, pareciera que el micro espumado inducido por la zeolita, permite en primera instancia una disminución de la fricción entre partículas de árido al ser estas recubiertas mas eficientemente por una película de asfalto espumado. La situación anterior ayudaría en el proceso de compactación y seguidamente, luego de disminuir el efecto del micro espumado, la fricción y cohesión entre los áridos aumentaría con la disminución del volumen de asfalto.

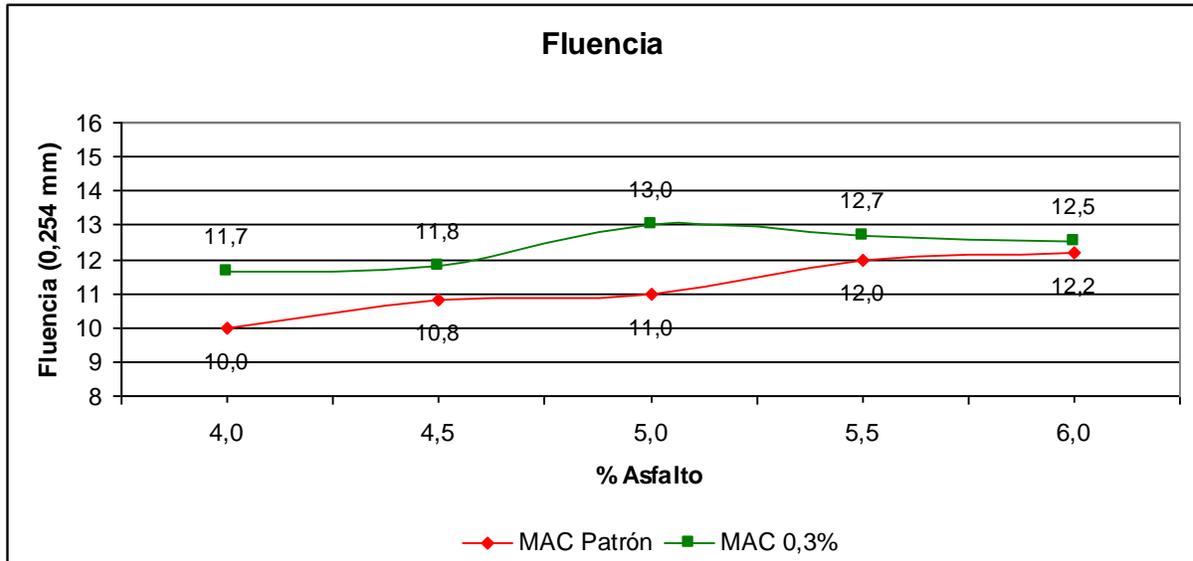


Figura 5.6 – Fluencia MAC Patrón y MAC 0,3%.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

En relación a la fluencia (Figura 5.6), el análisis de varianza realizado a los valores de las probetas ensayadas, indica que solo existen diferencias estadísticamente significativas para los contenidos de asfalto correspondientes a 4% y 5%. En estos porcentajes de asfalto, la mezcla con zeolita se muestra levemente más deformable que la mezcla patrón, registrándose un aumento de 16,7% y 18% en la fluencia de la mezcla con zeolita en los contenidos asfálticos de 4% y 5%, respectivamente. No obstante, para ambas mezclas las deformaciones se encuentran dentro de los límites establecidos por la normativa chilena (ver Tabla 5.2, columna Fluencia) para mezclas asfálticas en caliente, en todos los contenidos asfálticos evaluados.

Es interesante notar que aún cuando la mayor estabilidad lograda por la mezcla con zeolita podría asociarse a una mayor rigidez en relación a la mezcla patrón, los valores de fluencia mostrados por la mezcla con zeolita nos indican que no es mas frágil que la mezcla patrón ya que antes de la falla, bajo aplicación de carga, se deformó de manera similar. En definitiva, la MAC 0,3% logró resistir mas carga que la MAC Patrón, pero no falló súbitamente al ser alcanzado el valor de carga límite, si no que se deformó según lo esperado para una mezcla asfáltica que se utiliza en pavimentos flexibles.

Finalmente, es interesante notar que la mezcla con zeolita y contenido asfáltico de 4,5% presentó mayor estabilidad que la mezcla patrón en el contenido asfáltico de 5%. A su vez, también se observa que los valores de fluencia y propiedades volumétricas de la mezcla con zeolita y contenido asfáltico de 4,5%, son muy similares a los obtenidos por la mezcla patrón en el contenido asfáltico de 5%. Esto puede ser apreciado en la Tabla 5.3 (página siguiente) y reafirma el hecho de que la incorporación de zeolita a una mezcla asfáltica en caliente permitiría reducir los contenidos de asfalto. Sin embargo, es necesario realizar nuevos estudios que permitan evaluar la incorporación de zeolita natural chilena a mezclas asfálticas en caliente en donde se analicen otras propiedades consideradas por otros métodos de diseño que complementen y amplíen lo observado en este estudio.

Tabla 5.3 – Comparación MAC Patrón y MAC 0,3%.

	ASFALTO (%)	DENSIDAD (kg/m3)	ESTABILIDAD (KN)	FLUENCIA (0,25 mm)	VAM (%)	Va (%)	VLL (%)
MAC Patrón	5,0	2333,3	15,41	11,0	15,66	5,41	65,47
MAC 0,3%	4,5	2330,0	16,62	11,8	15,37	6,18	59,79

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Esta etapa experimental ha dado indicios claros de la posibilidad de producir mezclas asfálticas en caliente con una reducción en su contenido asfáltico al incorporar zeolita natural chilena. Esto en base al aumento de estabilidad y densidad de la mezcla con zeolita para la mayoría de los contenidos asfálticos evaluados, en comparación con la mezcla patrón.

En relación a los criterios que se pudiesen utilizar para la obtención del porcentaje óptimo de asfalto en mezclas calientes con zeolita, los resultados obtenidos señalan como una posibilidad el utilizar criterios de diseño en donde el porcentaje adecuado de asfalto sea aquel en donde la mezcla con zeolita presente propiedades volumétricas y mecánicas equivalentes a una mezcla patrón que haya sido fabricada a través de métodos tradicionales de diseño.

5.2 Resultados de las mezclas tibias con zeolita natural chilena

En esta etapa, se fabricaron 4 mezclas a temperaturas dentro del rango de elaboración de mezclas tibias de asfalto y a 3 de ellas se les incorporó zeolita en porcentajes crecientes. Las temperaturas de mezclado y compactación fueron de 135 °C y 125 °C, respectivamente. El contenido de asfalto para todas las mezclas es de un 5% correspondiente al óptimo obtenido en el diseño de la MAC 0,3 %.

Para cada mezcla y contenido de zeolita, se confeccionaron probetas normalizadas y se ensayaron según lo descrito en el capítulo 4 y de acuerdo a los procedimientos del Manual de Carreteras, relativos a mezclas asfálticas, en sus volúmenes 5 y 8.

La masa de zeolita incorporada estaba constituida por un 50% en tamaño 0,15 mm (N° 100), un 40% en tamaño 0,075 mm (N° 200) y un 10% de tamaño menor a 0,075 mm (bajo N° 200). A su vez, para no alterar significativamente el peso específico del árido combinado, la zeolita reemplazó en peso equivalente al árido cuyo tamaño coincide con la zeolita incorporada en cada mezcla; así, para una probeta de 1100 g y 0,3% de zeolita, se extrajeron 3,3 g de árido en los tamaños y porcentajes indicados, y se incorporó 3,3 g de zeolita. Dado que la zeolita utilizada presenta una densidad similar al árido utilizado, el reemplazo parcial de árido fino se realizó en peso. Cabe señalar, que la zeolita fue incorporada a la mezcla en la etapa de mezclado siendo agregada al resto de los áridos en conjunto con el asfalto.

La “Mezcla 0%” corresponde a una mezcla sin zeolita realizada para verificar los efectos de la disminución de la temperatura de producción en sus propiedades volumétricas y mecánicas. La “Mezcla 0,3%”, “Mezcla 0,6%” y “Mezcla 1%” corresponden a las 3 mezclas que se les incorporó zeolita en el porcentaje indicado. La Tabla 5.4 resume lo citado anteriormente.

Tabla 5.4 – Temperaturas de trabajo e Incorporación de zeolita en las mezclas.

Mezclas	Temperatura de mezclado (°C)	Temperatura de compactación (°C)	Incorporación de zeolita (%)	Gramos de zeolita en probeta de 1100 g
Mezcla 0%	135	125	0	0
Mezcla 0,3%	135	125	0,3	3,3
Mezcla 0,6%	135	125	0,6	6,6
Mezcla 1%	135	125	1	11

Fuente: Elaboración propia, 2017.

5.2.1 Propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia

En la Tabla 5.5 se muestra un cuadro resumen de los valores promedio que se obtuvieron, en las distintas mezclas, de las propiedades volumétricas, resistencia a deformación plástica (estabilidad) y fluencia. Se incluyen además los valores correspondientes a la mezcla patrón para ser comparados con las mezclas trabajadas a menor temperatura. Los valores de cada una de las mediciones realizadas a las probetas confeccionadas, se encuentran en Anexos B7 al B9.

Tabla 5.5 – Propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.

MEZCLAS	DENSIDAD (Kg/m ³)	ESTABILIDAD (KN)	FLUENCIA (0,25 mm)	VAM (%)	Va (%)	V _{LL} (%)
MAC Patrón	2333,3	15,41	11,0	15,66	5,41	65,47
Mezcla 0%	2327,6	13,41	12,2	15,87	5,64	64,45
Mezcla 0,3%	2350,6	16,38	14,1	15,03	4,71	68,69
Mezcla 0,6%	2342,6	16,19	12,9	15,32	5,03	67,17
Mezcla 1%	2345,4	15,42	11,4	15,22	4,92	67,70

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Para constatar las diferencias estadísticamente significativas consultar Anexos C11 al C13, en donde se presentan estadísticos descriptivos de los valores obtenidos de las probetas ensayadas, análisis de varianza entre grupos de comparación y subconjuntos homogéneos en donde se agrupan las mezclas que no presentaron diferencias en sus promedios, según variable analizada.

Las pruebas de comparaciones múltiples realizadas a los valores promedio de las mezclas para cada una de las variables analizadas, determinaron que los valores se agrupan en tres subconjuntos homogéneos en todas las propiedades evaluadas. Para facilitar la presentación de resultados, en los gráficos siguientes se ha asignado un color específico a aquellas mezclas que no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sus promedios, de tal manera que queden explícitos los subconjuntos homogéneos que arrojaron las pruebas de comparación múltiple. Estos subconjuntos son categorizados como “Menor”, “Medio” y “Mayor” en relación a la magnitud de los valores que agrupan. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

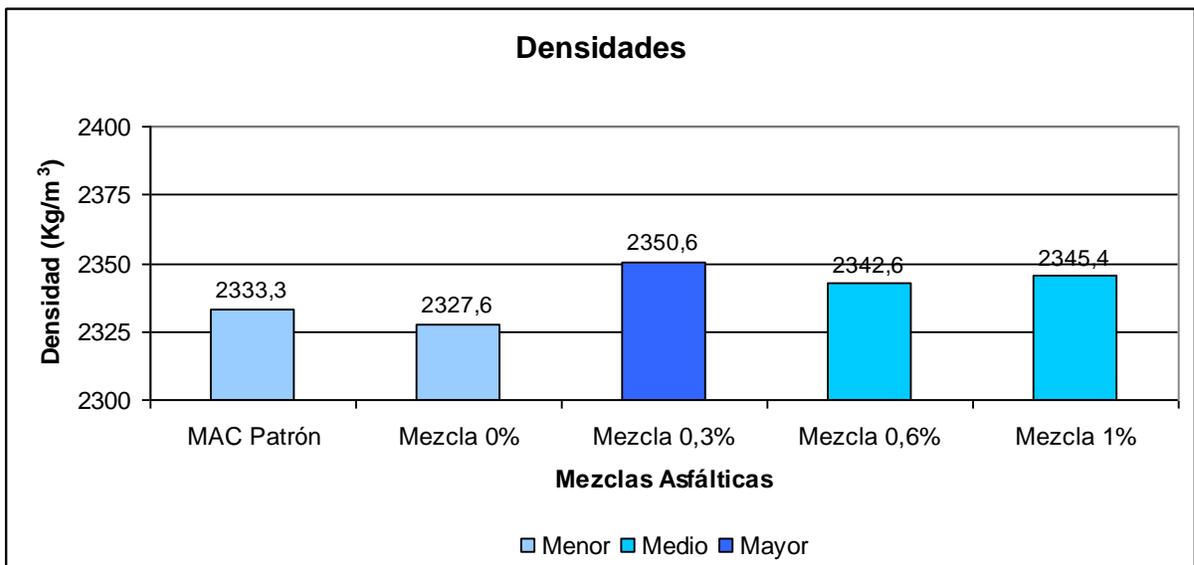


Figura 5.7 – Densidad real compactada de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En cuanto a las densidades de las mezclas compactadas (Figura 5.7), el análisis de varianza y comparaciones múltiples estableció que la MAC Patrón y la Mezcla 0% no presentaron diferencias estadísticamente significativas aún cuando la Mezcla 0% fue compactada a una temperatura menor. Este resultado puede relacionarse con el hecho de que la energía de compactación fue la misma para todas las mezclas y para el caso de aquellas que no contenían zeolita, la carga aplicada por el martillo compactador fue suficiente para producir una misma densidad independientemente de la temperatura de compactación. A su vez, esto concuerda con estudios recientes [43] en donde se establece que al reducir la temperatura de compactación, se mantiene la densidad de la mezcla compactada en un rango aceptable, pero la vida útil esperada en la estructura de pavimento disminuye notablemente. En este sentido, como se detalla más adelante, la mezcla a la que se redujo la temperatura de compactación y no se le incorporó zeolita (Mezcla 0%), es la que presentó propiedades más desfavorables.

Para las mezclas con incorporación de zeolita se registraron valores más altos de densidad, agrupándose las mezclas con 0,6% y 1% de zeolita en el mismo grupo al no verificarse diferencia estadísticamente significativa entre sus promedios. No obstante presentaron mayor densidad que la mezcla patrón. Por su parte, la mezcla con un 0,3% de zeolita obtuvo el mayor valor de densidad logrando un incremento de un 0,7% con respecto a la mezcla patrón.

Estos resultados indican que el efecto del micro espumado tras la incorporación de zeolita natural chilena a la mezcla asfáltica, efectivamente produjo un pequeño aumento de la densidad aún cuando estas mezclas fueron compactadas a una temperatura de 25 °C menos que la utilizada en la mezcla patrón. Este hecho es reafirmado al comparar los resultados de las mezclas con zeolita, con la Mezcla 0% que también fue compactada a la misma temperatura. Si la zeolita no causara efecto alguno, cabría esperar resultados similares en todas las mezclas tibias fabricadas, sin embargo se observan diferencias estadísticamente significativas tras la incorporación de zeolita. Al igual que en el caso de la incorporación de zeolita en la mezcla en caliente analizada en la sección anterior, podemos inferir que la inclusión de zeolita en estas mezclas tibias produjo una mejora en la trabajabilidad a través del micro espumado que, aumentando el volumen del asfalto, envolvió en forma mas efectiva las partículas de árido y provocó a su vez un mejor reacomodo de las partículas ante los golpes del martillo compactador. En este sentido, la mejora en la trabajabilidad que produciría la incorporación de la zeolita, es apoyada por el hecho que para la misma energía de compactación las mezclas con zeolita muestran una mayor densificación en comparación con la mezcla patrón a pesar de la reducción en la temperatura de compactación.

Por otro lado, los resultados correspondientes a vacíos en el agregado mineral (VAM), huecos de aire (V_a) y huecos llenos de asfalto (V_{LL}) se corresponden con los valores obtenidos de la densidad, de tal manera que se observan en ellos las mismas tendencias. Así, el análisis estadístico muestra también diferencias estadísticamente significativas entre las mismas mezclas que presentaron diferente densidad.

Como ya se ha comentado anteriormente, pequeñas variaciones en las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas tienen gran incidencia en el comportamiento observado en laboratorio y en la vida de servicio. Por lo tanto, si bien las diferencias observadas en los valores de VAM, V_a y V_{LL} de cada mezcla analizada pudieran parecer pequeñas, suponen algún grado de influencia en el comportamiento y desempeño que la mezcla presentará.

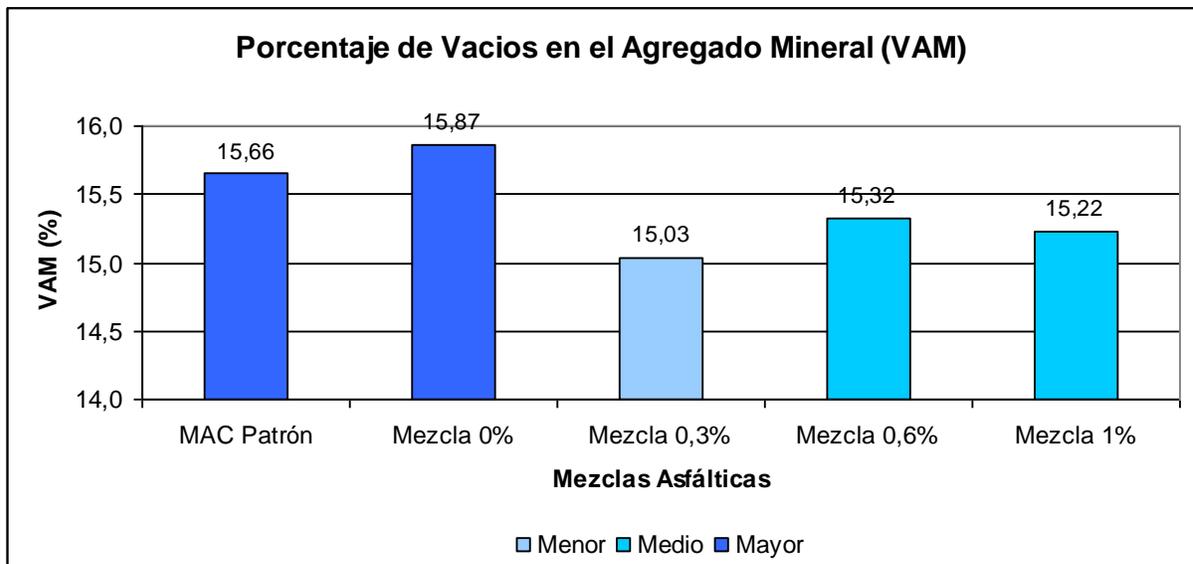


Figura 5.8 – Porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En la Figura 5.8 se muestran los resultados correspondientes a porcentajes de vacíos en el agregado mineral en donde primeramente se aprecia que todas las mezclas presentaron valores por sobre el 14% exigido como mínimo por la normativa chilena [16] para mezclas con árido pétreo de tamaño máximo nominal igual a 20 mm.

Entre la mezcla patrón y la mezcla tibia sin zeolita (Mezcla 0%) no se observan diferencias estadísticamente significativas y a su vez fueron las que mostraron mayor porcentaje de VAM, obviamente relacionado con la menor densificación que obtuvieron en relación a las mezclas con incorporación de zeolita.

La mayor densidad mostrada por las mezclas con zeolita produjo que éstas presentaran una ligera disminución en los porcentajes de VAM que fue validada por el análisis de varianza realizado. Así, las mezclas con 0,6% y 1% de zeolita disminuyeron los vacíos en el agregado mineral en un 0,4% con respecto a la mezcla patrón, y la mezcla con 0,3% de zeolita presentó una disminución de 0,6% en el porcentaje de VAM.

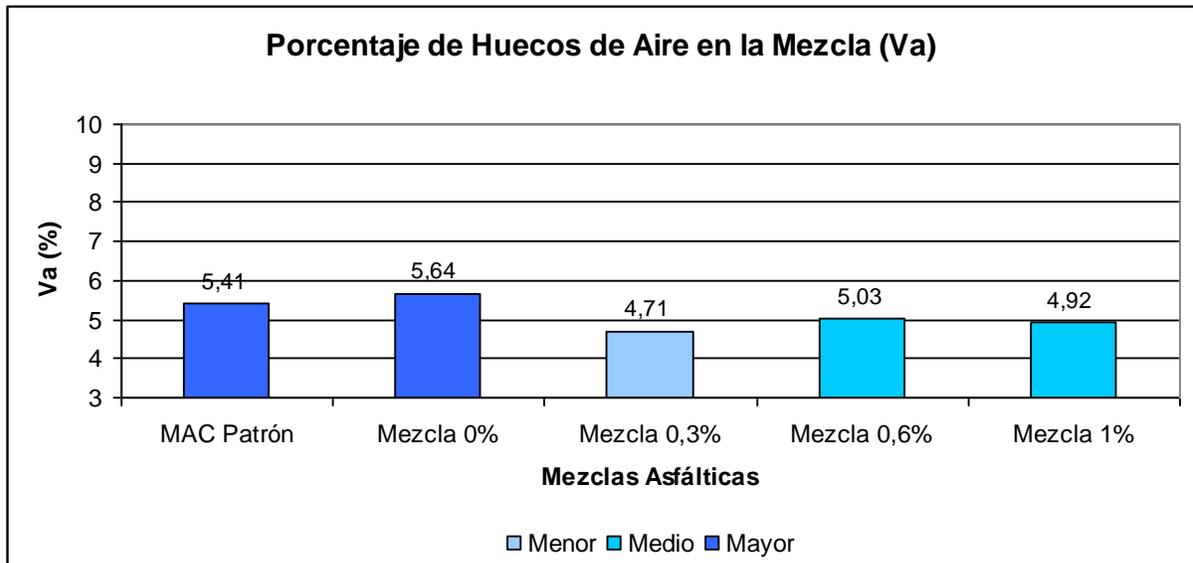


Figura 5.9 – Porcentaje de huecos de aire en la mezcla de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

Los porcentajes de huecos de aire (Va) en las mezclas analizadas (Figura 5.9), son el reflejo de los resultados presentados para VAM y a su vez están en conformidad con la densificación obtenida.

Las mezclas con incorporación de zeolita en dosis de 0,6% y 1%, obtuvieron menores contenidos de huecos de aire que la mezcla patrón, disminuyendo sus respectivos Va en un rango de 0,4% a 0,5%. Por su parte la mezcla con 0,3% de zeolita, dada su mayor densidad, presentó el menor contenido de huecos de aire mostrando una reducción de 0,7% con respecto a la mezcla patrón.

Cabe señalar que existen estudios [44,46,49] que correlacionan pequeñas disminuciones en el contenido de huecos de aire con aumentos en la resistencia a fatiga de las mezclas asfálticas, con mayor resistencia a la deformación y en general con una vida útil más prolongada del pavimento asfáltico. En consecuencia, es factible esperar que los menores contenidos de Va en las mezclas tibias con zeolita analizadas en este estudio, produzcan en las mezclas aquellos comportamientos asociados a la reducción de huecos de aire.

Por otro lado, los menores contenidos de Va en las mezclas con zeolita pueden asociarse a mezclas de menor permeabilidad lo que asegura una menor exposición de la superficie asfáltica al agua y al oxígeno. Esta condición podría disminuir posibles problemas de *stripping* (ver "*stripping*" en glosario de términos) causados por el agua y ralentizar los procesos de envejecimiento del asfalto.

Existen dos casos que se pueden analizar, referentes a las mezclas con zeolita, en donde se vislumbra el comportamiento esperado ante el fenómeno de *stripping*.

Uno es el hecho que por ser las mezclas con zeolita mas compactas y tener menos V_a , poseen a su vez menor superficie de asfalto expuesta al oxígeno del ambiente y al agua que podría eventualmente infiltrarse en los vacíos de aire. A su vez, el menor contenido de V_a y mayor densidad, hacen de la mezcla con zeolita una mezcla de mayor impermeabilidad. Estas condiciones disminuyen las probabilidades de *stripping* y envejecimiento prematuro.

Por otro lado está el hecho de que las mezclas con zeolita, al producirse un micro espumado de agua, podrían mantener agua residual en el interior de vacíos, lo que en este caso sería una condición desfavorable ante los deterioros o fenómenos que se asocian a la presencia de agua en la mezcla.

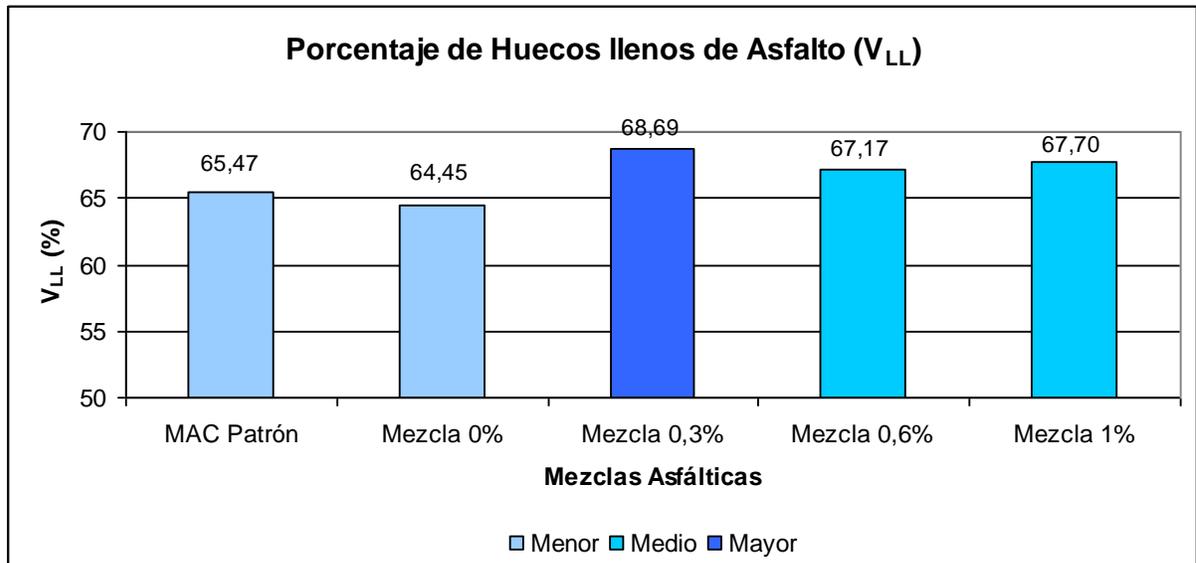


Figura 5.10 – Porcentaje de huecos llenos de asfalto de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En cuanto a los huecos llenos de asfalto (Figura 5.10), debemos recordar que todas las mezclas poseen la misma cantidad de asfalto (5%). No obstante, debido a que las mezclas analizadas presentaron densidades distintas, el espacio disponible para acomodar el contenido asfáltico también varía. Consecuentemente, los mayores porcentajes de huecos llenos de asfalto (V_{LL}) se presentan para las mezclas con zeolita que poseen menores porcentajes de vacíos en el agregado mineral.

El cálculo del porcentaje de asfalto que es absorbido por el árido, se basa en las propiedades del agregado mineral (densidad real seca y densidad efectiva) y en la densidad del asfalto a 25 °C. Por lo tanto, dado que todas las mezclas contienen el mismo contenido asfáltico y materiales, a excepción del reemplazo parcial de árido fino por zeolita, el porcentaje de asfalto absorbido por el agregado mineral debiera ser aproximadamente el mismo. Sin embargo, la menor temperatura de calentamiento del asfalto en las mezclas con zeolita podría haber ocasionado una menor absorción de asfalto por parte del agregado mineral en estas mezclas ya que las viscosidades del asfalto en la etapa de producción de las mezclas tibias y caliente, no es la misma. Esta situación eventualmente ocasionaría que el asfalto útil fuera ligeramente mayor en las mezclas con zeolita.

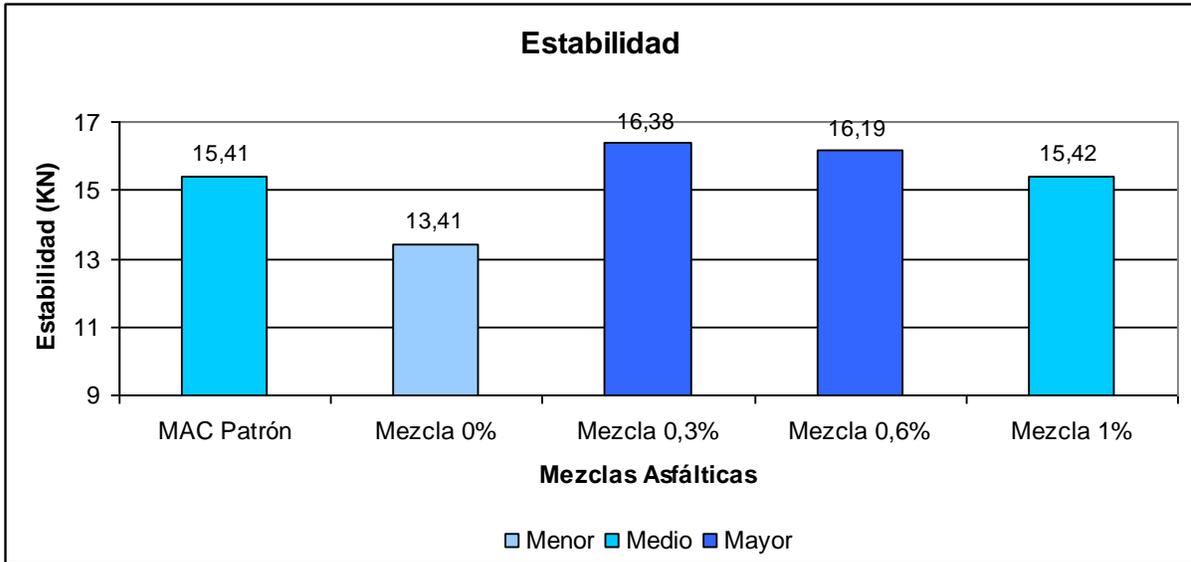


Figura 5.11 – Estabilidad de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

En lo concerniente a la estabilidad obtenida por las mezclas (Figura 5.11), la disminución de la estabilidad observada en la mezcla tibia sin zeolita, concuerda con lo expresado en investigaciones [48,49] en donde se concluye que la reducción de las temperaturas de mezclado y compactación producen comportamientos mecánicos inferiores aún cuando se mantengan los valores de la densidad. Estas investigaciones analizan mezclas asfálticas sin el uso de algún aditivo o adición con el fin de verificar el efecto de la disminución de las temperaturas de trabajo sin la intervención de otras variables.

En relación a lo anterior, la mezcla patrón y la mezcla tibia sin zeolita (Mezcla 0%), que habían presentado densidades muy similares, obtuvieron distinto valor de estabilidad, registrándose una disminución de 13% en esta propiedad para la Mezcla 0% debido a la reducción de la temperatura de trabajo.

Las mezclas tibias con incorporación de zeolita obtuvieron igual o mayor estabilidad que la mezcla patrón, no observándose en ellas los efectos de la disminución de las temperaturas de trabajo que sí se verificaron en la mezcla tibia sin zeolita. La mezcla con un 1% de zeolita presentó la misma estabilidad que la mezcla patrón, mientras que las mezclas con 0,3% y 0,6% de zeolita incrementaron su resistencia a deformación plástica hasta en un 6,2% en el caso de la mezcla con 0,3% de zeolita, equivalente a cerca de 1KN más de carga resistida antes de la falla.

Así como fue presentado anteriormente en los resultados de la mezcla en caliente con incorporación de zeolita, los resultados obtenidos por las mezclas tibias con zeolita en relación a la estabilidad, indican que el micro espumado inducido por la zeolita facilitó la cohesión de las partículas de árido aún cuando el asfalto fue calentado a una temperatura 30 °C menor que la mezcla patrón. El aumento del volumen del asfalto por acción del micro espumado, habría permitido en primera instancia un recubrimiento mayor del árido y luego, al disminuir el efecto del agua en el asfalto, el ligante disminuyó su volumen provocándose un efecto similar al aumento de viscosidad que a su vez habría cohesionado en forma mas efectiva los áridos que ya estaban recubiertos por una película de asfalto.

El hecho de que la mezcla con un 1% de zeolita haya presentado la misma estabilidad que la mezcla patrón y a su vez menor estabilidad que las mezclas con 0,3% y 0,6% de zeolita, señalan que para contenidos de zeolita superiores a 0,6%, el efecto del micro espumado en relación al cohesionado de las partículas de árido pierde efectividad posiblemente por la presencia de agua remanente que podría afectar la adherencia del asfalto en la superficie del árido. No obstante, la mezcla con un 1% de zeolita obtuvo mayor estabilidad que la Mezcla 0% indicando que esa dosis de

zeolita, aún cuando presente contenidos de agua residual, logra compensar los efectos de la disminución de la temperatura en la resistencia a deformación plástica de la mezcla.

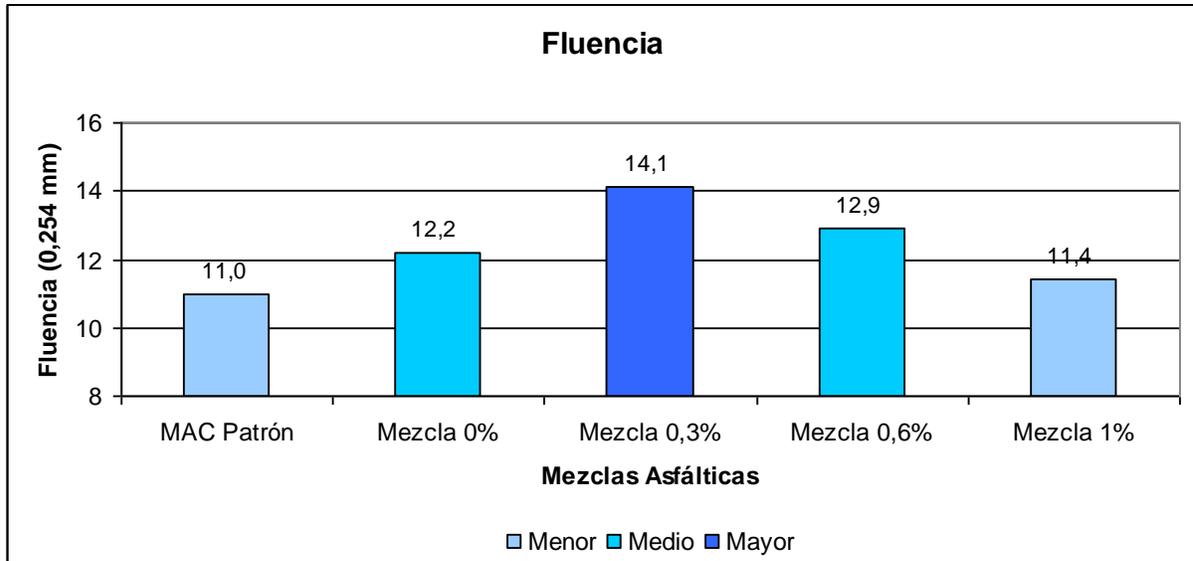


Figura 5.12 – Fluencia de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

En relación a la deformación experimentada por las mezclas (Figura 5.12), el análisis estadístico demostró que existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de fluencia aún cuando la deformación mostrada en todas las mezclas está dentro del rango permitido por la normativa chilena para mezclas asfálticas (ver Tabla 5.2, columna Fluencia).

Las mezclas con zeolita mostraron una cantidad de fluencia decreciente a medida que se aumentó el contenido de zeolita. La mezcla con 0,3% de zeolita presentó la mayor fluencia con un 28% más deformación que la mezcla patrón. La mezcla con 0,6% de zeolita presentó una deformación similar a la obtenida por la mezcla tibia sin zeolita pero superior en un 17% en relación a la mezcla patrón. Por su parte, la mezcla con un 1% de zeolita se deformó de manera casi idéntica a la mezcla patrón.

Cabe señalar que la deformación admisible indicada en la normativa chilena [16] establece un rango muy pequeño que va desde un mínimo de 2 mm a un máximo de 4 mm. Por lo tanto, si bien en la práctica las diferencias observadas son pequeñas, estas existen y señalan que las mezclas con zeolita presentaron una mayor rigidez a medida que se aumentó la dosis de zeolita. Por otra parte, al cotejar los valores de fluencia con los valores de estabilidad de las mezclas con zeolita, se aprecia que la mezcla con mayor estabilidad también es la más deformable, y que al aumentar la dosis de zeolita incorporada, las mezclas mostraron menor estabilidad y mayor rigidez.

El fenómeno de envejecimiento que se traduce en una rigidización del asfalto, ocurre en forma temprana al mezclar y compactar a altas temperaturas debido a la oxidación del asfalto y a la volatilización de componentes livianos (del tipo aceite). Por otro lado, las mezclas con altos contenidos de huecos de aire también son más propensas a los procesos de envejecimiento debido a una mayor superficie en contacto con oxígeno contenido en el aire o agua que podría eventualmente infiltrarse hacia los huecos de la mezcla.

En general, a excepción de la Mezcla 1%, todas las mezclas tibias presentaron más fluencia que la mezcla patrón y por ende se asume que son mezclas más flexibles y dúctiles. Esto puede deberse a que sufrieron menos oxidación por el hecho de haber sido mezcladas y compactadas a menor temperatura. En este sentido, la bibliografía indica que las mezclas que toleran altas

deformaciones antes de alcanzar la falla resisten mejor los agrietamientos comparadas con las mezclas que no toleran altas deformaciones [43].

Por su parte, la menor deformación mostrada por la Mezcla 1% podría tener su explicación en la presencia de agua remanente que habría influido en el proceso de envejecimiento temprano de tal forma que el asfalto se oxidó en mayor medida que las mezclas con menores contenidos de zeolita.

5.2.2 Ensayos de Tracción Indirecta (ITS)

Como fuera indicado en el diseño y desarrollo experimental, todas las mezclas tibias fueron sometidas al ensayo de Tracción Indirecta. Para ello se confeccionaron 6 probetas para cada mezcla en estudio, de las cuales 3 fueron ensayadas en condición seca y 3 en condición saturada superficialmente seca (sss).

En la Tabla 5.6 se muestra un cuadro resumen de los valores promedio que se obtuvieron, en las distintas mezclas, de resistencia a tracción indirecta (ITS) y porcentajes de resistencia a tracción retenida (TSR). Se incluyen además los valores correspondientes a la mezcla patrón para ser comparados con las mezclas trabajadas a menor temperatura. Los valores de cada una de las mediciones realizadas a las probetas confeccionadas, se encuentran en Anexo B10

Tabla 5.6 – Valores de resistencia a tracción indirecta y porcentajes de resistencia a tracción retenida de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.

MEZCLAS	ITS Seco (Kpa)	ITS Saturado (Kpa)	TSR (%)
MAC Patrón	1233,3	1093,3	88,6
Mezcla 0%	924,0	734,6	79,5
Mezcla 0,3%	1016,1	901,0	88,7
Mezcla 0,6%	1015,3	932,7	91,9
Mezcla 1%	1118,6	917,7	82,0

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Para corroborar las diferencias estadísticamente significativas consultar Anexos C14 al C17, en donde se presentan estadísticos descriptivos de los valores obtenidos de las probetas ensayadas, análisis de varianza entre grupos de comparación y subconjuntos homogéneos en donde se agrupan las mezclas que no presentaron diferencias en sus promedios, según variable analizada.

Las pruebas de comparaciones múltiples realizadas a los valores promedio de las mezclas para cada una de las variables analizadas, determinaron que los valores se agrupan en cuatro subconjuntos homogéneos en el caso de la tracción indirecta en estado seco, y en tres grupos para el caso del ensayo en condición saturada. Para facilitar la presentación de resultados, en los gráficos siguientes se ha asignado nuevamente un color específico a aquellas mezclas que no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sus promedios, de tal manera que queden explícitos los subconjuntos homogéneos que arrojaron las pruebas de comparación múltiple. Estos subconjuntos son categorizados como “Menor”, “Medio” y “Mayor” en relación a la magnitud de los valores que agrupan. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

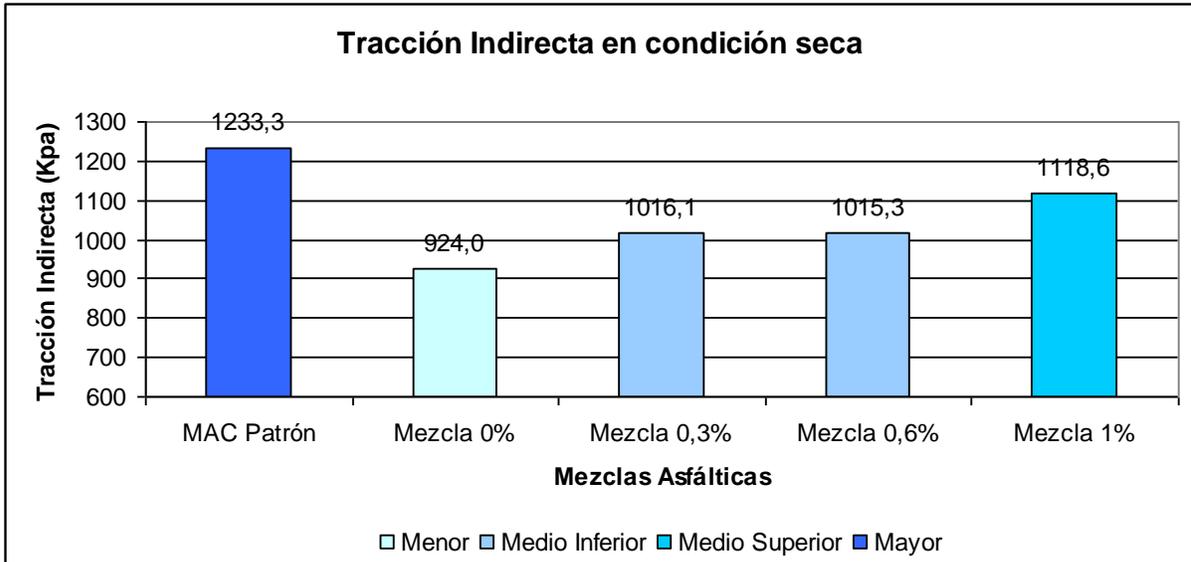


Figura 5.13 – Valores de Tracción Indirecta en condición seca de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

En lo concerniente a los valores del ensaye ITS en condición seca (Figura 5.13), la disminución de la temperatura de trabajo se torna mucho más relevante. Esto se ve claramente reflejado en la superioridad de la mezcla patrón en cuanto al valor de resistencia obtenido.

La mayoría de los estudios que correlacionan los valores de la densidad con la resistencia a tracción indirecta, indican que existe una relación directa entre estas dos propiedades. Pero, en los resultados obtenidos en las mezclas tibias con zeolita no se observó esa tendencia pues obtuvieron valores de ITS seco menores que la mezcla patrón aún cuando sus densidades eran más altas. Sin embargo, es posible encontrar una relación en la fluencia de las mezclas con zeolita y su resistencia a tracción indirecta en estado seco. Así, dados los resultados obtenidos, podemos inferir que de entre las mezclas con zeolita aquellas que se presentaron más deformables tuvieron un menor valor de ITS en estado seco.

Las mezclas con 0,3% y 0,6% de zeolita presentaron un 18% menos resistencia en estado seco con respecto a la mezcla patrón, mientras que la mezcla con 1% de zeolita incorporada obtuvo 9% menos. Parte de esta disminución podría deberse a la menor temperatura de mezclado y compactación de las mezclas tibias, no obstante, es interesante destacar que en esta condición de ensaye quedó en evidencia que a mayor contenido de zeolita se obtuvo una mejor respuesta de las mezclas ante la tracción indirecta, notándose que las mezclas con zeolita en todos los casos resistieron más que la mezcla tibia sin zeolita trabajada a 135 °C (Mezcla 0%) quien presentó el valor mas bajo registrando una disminución de 25% de resistencia en estado seco con respecto a la mezcla patrón.

También, como ya se ha comentado, las disminuciones en la temperatura de compactación podrían mantener los valores de densidad en un rango aceptable pero finalmente provocar desempeños más desfavorables en otras propiedades mecánicas. Tal es el caso de la Mezcla 0% quien presentara una densidad muy similar a la mezcla patrón, pero que en definitiva no obtiene el mismo desempeño al ser evaluada en otras propiedades.

Por otro lado, la densidad no es la única variable que afecta la resistencia de la mezcla ni tampoco la de más influencia, pues como se comentara en los resultados de la estabilidad, la cohesión de la mezcla y la adherencia de las partículas de árido con el asfalto, tienen gran incidencia en el comportamiento de la mezcla al ser sometida a esfuerzos. En este sentido, es probable que las mezclas con incorporación de zeolita tengan una mayor cohesión entre sus partículas de agregado mineral de tal forma que bajo las mismas condiciones de temperatura resistieron mas tracción que la mezcla tibia sin zeolita.

Los resultados de estabilidad mostraron una disminución de esta propiedad en la mezcla con un 1% de zeolita en relación con las dosis menores, posiblemente debido a la presencia de agua residual que habría afectado la cohesión y provocado algunas dificultades con la adherencia del asfalto en la superficie del árido. Sin embargo, al contrario de lo observado en la estabilidad, la resistencia a tracción indirecta en estado seco fue mayor a medida que se aumentó el contenido de zeolita. Esta diferencia podría radicar en el distinto proceso de acondicionamiento de las probetas previo a los ensayos. Para el caso de los especímenes que son utilizados en el ensayo de estabilidad y fluencia, la normativa chilena [16,20] indica que se deben secar hasta masa constante en horno a 50 ± 5 °C lo que en la práctica supone un tiempo estimado de 12 a 16 horas. Por su parte, para el ensayo de tracción indirecta, las probetas se curan en un horno de aire forzado a una temperatura de 40 °C por 72 horas. Estas diferencias en los procesos de acondicionamiento de las probetas de ensayo podrían cosechar diferencias en la eliminación de agua residual en la mezcla. Por lo anterior, es posible que el mayor tiempo de curado de las probetas utilizadas para evaluar la resistencia a tracción indirecta de las mezclas, haya permitido una eliminación mayor de agua residual en los poros accesibles de menor dimensión. Así, el mayor valor de ITS seco presentado por la mezcla con 1% de zeolita, nos indica que el efecto de la eliminación de agua residual fue más significativo para ella que para las otras mezclas con zeolita.

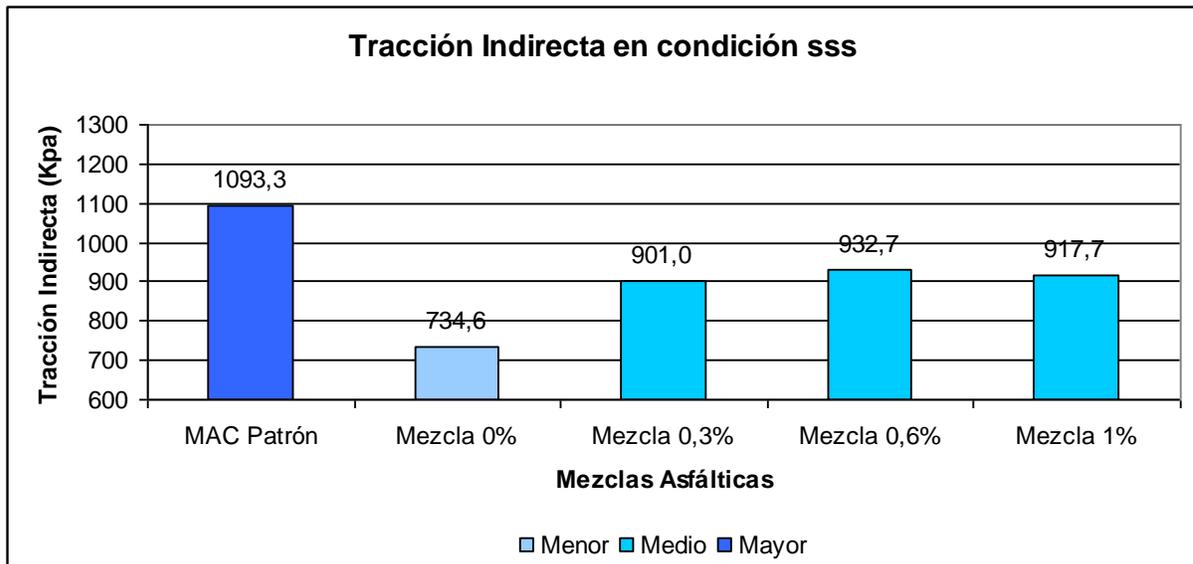


Figura 5.14 – Valores de Tracción Indirecta en condición saturada superficialmente seca (sss) de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En cuanto a la resistencia a tracción indirecta en estado de saturación (Figura 5.14), las mezclas con zeolita mostraron valores muy similares, no verificándose diferencias estadísticamente significativas entre ellas. El porcentaje de disminución en el valor de ITS saturado de las mezclas con zeolita fluctúa entre 15% a 18% con respecto a la mezcla patrón. No obstante, también en este caso la mezcla tibia sin zeolita presenta el menor valor con una disminución de 33% en su resistencia a tracción indirecta con respecto a la MAC Patrón.

Es esperable que bajo las condiciones de esta etapa del ensayo, en donde las probetas son saturadas en un baño de agua a 25 ± 1 °C por 24 horas, el agua penetre entre la película de asfalto y la superficie de los agregados, causando una falla por adhesión deficiente. Adicionalmente el agua puede mezclarse con el asfalto afectando la cohesión y reduciendo la rigidez.

En general, estos resultados concuerdan con estudios experimentales [7] en donde se señala que las disminuciones en las temperaturas de trabajo ocasionan mayor susceptibilidad a la humedad en las mezclas asfálticas, debido al secado incompleto de los áridos. Por otro lado, los ensayos

efectuaos a diversas tecnologías de mezclas tibias, entre ellas procesos de espumado con zeolitas sintéticas, atestiguan que en este tipo de mezclas el potencial daño por humedad se exagera.

Las diferencias observadas al comparar la Mezcla 0% con aquellas que contenían zeolita, podría ser explicada por el mayor contenido de huecos de aire que presentó la mezcla tibia sin zeolita. En este sentido, la Mezcla 0% posee mayor superficie de asfalto expuesta al agua que podría eventualmente infiltrarse en los vacíos de aire interiores. Esta condición habría afectado en mayor medida la resistencia a tracción indirecta de esta mezcla. Por su parte, las mezclas con zeolita presentaban menores contenidos de huecos de aire lo que haría presumir mayor impermeabilidad que la mezcla sin zeolita.

Otra cuestión a considerar es que, debido a las diferencias en las temperaturas de trabajo entre la MAC Patrón y las mezclas tibias con zeolita, los procesos de oxidación también fueron distintos. Esto permite inferir que la mezcla patrón experimentó una mayor rigidez del asfalto que en este caso habría permitido un mejor comportamiento ante la tracción indirecta.

Para visualizar mejor las disminuciones de resistencia al someter las mezclas a condiciones de saturación en agua, se adjunta el gráfico de la Figura 5.15.

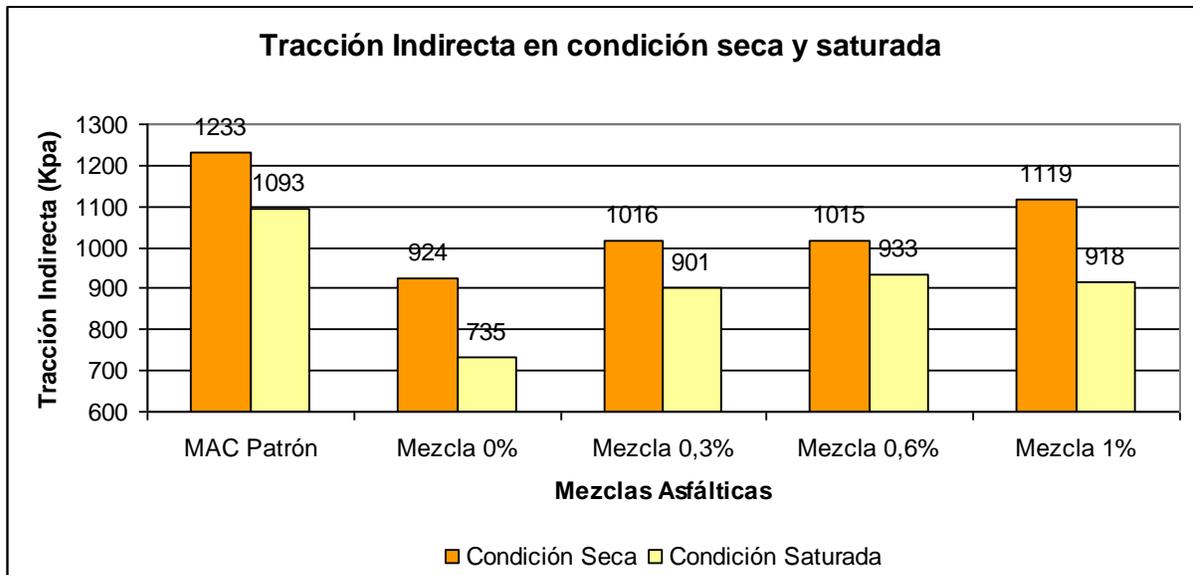


Figura 5.15 – Valores de Tracción Indirecta en condición saturada superficialmente seca (sss) de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Se aprecia que todas las mezclas, independientemente de la temperatura de compactación y dosis de zeolita incorporada, redujeron su resistencia a tracción indirecta bajo condiciones de saturación en agua. Sin embargo, los valores presentados en la Tabla 5.7 relativos a los porcentajes de resistencia a tracción retenida nos indican que la sensibilidad a la humedad no es igual en todas las mezclas analizadas.

Tabla 5.7 – Porcentajes de resistencia a tracción retenida (TSR) de la MAC Patrón y de las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.

MAC Patrón	Mezcla 0%	Mezcla 0,3%	Mezcla 0,6%	Mezcla 1%
88,6	79,5	88,7	91,9	82,0

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Partiendo de la base que todas las mezclas con zeolita obtuvieron prácticamente el mismo valor de resistencia a tracción indirecta en estado saturado, las resistencias mostradas inicialmente en estado seco determinan un comportamiento distinto entre éstas mezclas referente a la pérdida de resistencia a tracción al ser saturadas en baño de agua. La mezcla con 0,6% de zeolita, si bien no es la que presentó el mayor valor de ITS seco, presentó el mayor porcentaje de resistencia a tracción retenida (TSR) superando incluso a la mezcla patrón. Esto indica que de entre todas las mezclas analizadas, la mezcla con 0,6% de zeolita es la menos sensible a los efectos del humedecimiento.

Por su parte, la MAC Patrón y la Mezcla 0,3%, obtuvieron el mismo porcentaje de TSR y a su vez muy similar al obtenido por la mezcla con 0,6% de zeolita. Finalmente, las mezclas que se mostraron más susceptibles al efecto del agua fueron la Mezcla 0% y la Mezcla 1%, con una reducción en sus respectivas resistencias a tracción indirecta de 21% y 18%, respectivamente.

Pese a todos los estudios realizados a nivel internacional sobre el daño por humedad, en Chile, aún no existe un estudio amplio y una normativa determinada para exigir límites de susceptibilidad al daño en condiciones de humedad para todas o la mayoría de mezclas asfálticas. Sin embargo se prescribe el ensaye de tracción indirecta para la confección de mezclas asfálticas recicladas y estabilizadas con asfalto espumado, que es una tecnología de reciclado en frío, en sitio. Para el caso anterior, se pide que estas mezclas cumplan con un TSR mínimo de 50% en la zona norte, y un mínimo de 75% en el resto del país.

En relación a especificaciones internacionales, la Norma AASHTO T 283, indica un TSR mínimo de 80%, la Norma ASTM D 4867 prescribe un 75%, y la Norma UNE EN 12697 un valor de 85%.

En cualquier caso, los porcentajes de resistencia a tracción retenida presentados por las mezclas en estudio, nos han entregado información en cuanto a su comportamiento en presencia de agua.

5.3 Análisis, comentarios y discusión

A continuación se presentan algunos comentarios en donde se relacionan los resultados obtenidos en este estudio con antecedentes disponibles en la bibliografía actual. Si bien muchas de las propiedades deseables en una mezcla asfáltica dependen de variados factores, sólo nos referiremos a aquellos que guardan relación con la incorporación de zeolita o con los efectos que produjo en la mezcla asfáltica diseñada en esta etapa del estudio.

Los comentarios siguientes se relacionan con el comportamiento teórico que se puede esperar en las mezclas de acuerdo a los resultados obtenidos en laboratorio y tomando como referencia la experiencia y resultados que indica la bibliografía relacionada con el comportamiento de las mezclas asfálticas, ensayos de campo y las experiencias en donde se ha evaluado el rendimiento a mediano plazo de pavimentos con tecnologías similares a la implementada en este estudio.

5.3.1 Compactación

En general, tanto en la MAC 0,3% como en las mezclas tibias con zeolita se pudo observar un aumento en la densidad de las mezclas por lo que podemos decir que en general poseen una mayor compactación. Este hecho es atribuible a la mejora en la trabajabilidad de las mezclas introducida por el micro espumado de la zeolita en las dos temperaturas de mezclado utilizadas en este estudio (150 °C y 135 °C), es decir, que independiente de la temperatura de mezclado utilizada, las mezclas con zeolita obtuvieron mayor densidad que la mezcla patrón.

En este sentido, podría considerarse la inclusión de zeolita natural chilena como ayuda de compactación; se podría utilizar para mejorar el recubrimiento del asfalto a bajas temperaturas de mezclado y aumentar el tiempo de compactación de la mezcla durante el funcionamiento normal de las operaciones de pavimentación.

Estudios realizados en tramos experimentales [42,43] en donde se contrasta la compactación de MAT y MAC, indican que las MAT pueden lograr densidades similares en el lugar a temperaturas

mucho más bajas. A su vez, los resultados obtenidos en la presente investigación concuerdan con los estudios citados anteriormente. Por otro lado, debido a que para una misma energía de compactación las mezclas con zeolita lograron mayor densidad, también existe la posibilidad de alcanzar las densidades requeridas por proyecto utilizando una menor cantidad de energía al incorporar zeolita a la mezcla, lo que supondría un ahorro de energía en la compactación y un aumento del periodo de tiempo disponible para la compactación. Las consecuencias de esto incluyen la factibilidad de extender las distancias de transporte de las mezclas asfálticas y mejorar la compactación en climas fríos.

5.3.2 Curado

Como fuera comentado en la presentación de resultados de las mezclas tibias, los resultados obtenidos por la mezcla con un 1% de zeolita mostraron una disminución de estabilidad en relación a los contenidos de 0,3% y 0,6% de zeolita, posiblemente debido a la presencia de agua residual que habría afectado la cohesión y provocado algunas dificultades con la adherencia del asfalto en la superficie del árido. Sin embargo, en el caso de la resistencia a tracción indirecta en estado seco, la mezcla con un 1% de zeolita superó a sus pares presumiblemente por el mayor tiempo de curado exigido por el ensaye ITS.

Por lo anterior y en base a que la incorporación de zeolita a la mezcla supone a su vez la liberación de agua en ella, es necesario profundizar en este tópico ya que la presencia de agua residual en la mezcla puede conllevar a oxidación del asfalto y pérdida de adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto.

Existen estudios [1,31] en donde se aconseja al menos dos horas de curado a temperatura de compactación antes de los ensayos y en el caso específico de probetas elaboradas en laboratorio, para evitar resultados imprecisos o engañosos, se recomienda someter a la mezclas a un periodo de curado corto antes de compactar las probetas [31,47]. En otras investigaciones [26,31] se establece que no hay necesidad de un mayor periodo de curado para permitir la apertura al tráfico en las MAT producidas con tecnologías Aspha - Min (zeolita sintética). Sin embargo, existen antecedentes [6] que indican que la zeolita natural chilena libera agua a una tasa mayor que la zeolita sintética y tiene una vida media menor.

En cualquier caso, se recomienda estudiar en investigaciones futuras los períodos y temperaturas necesarias para efectuar un proceso eficiente de curado de mezclas que incorporen zeolita natural chilena. A su vez, el proceso de curado es recomendable ya que de este modo se simularía el envejecimiento a corto plazo que se produce en el silo y en el transporte de las mezclas.

5.3.3 Sensibilidad a la humedad

Los resultados de tracción indirecta en estado saturado, mostraron que todas las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena evaluadas en este estudio presentaron un descenso importante en su resistencia al ser sometidas a la saturación en agua.

La sensibilidad a la humedad experimentada por las mezclas tibias podría convertirse en un problema muy importante. Si la humedad producida por el micro espumado de la zeolita no se evapora totalmente durante el mezclado debido a las menores temperaturas, el agua permanecerá retenida en la mezcla provocando un aumento de la sensibilidad al daño por humedad.

Investigaciones realizadas en este tema con zeolitas sintéticas [7,26,27], en donde también se utilizó el ensayo de tracción indirecta para evaluar la susceptibilidad a la humedad, mostraron que el uso de Aspha - Min (zeolita sintética) disminuía el índice de tracción indirecta en comparación con la mezcla de control convencional. Solo tres de las nueve probetas ensayadas cumplieron el requisito de la norma americana Superpave de 80% de resistencia conservada entre las muestras saturadas y las secas, lo que se cree puede estar conectado con la espumación del asfalto a partir de la humedad liberada por la zeolita, causando fallo en la cohesividad.

Si bien las mezclas tibias con incorporación de zeolita natural chilena evaluadas en este estudio, mostraron menores valores de ITS en relación a la mezcla patrón, la mezcla con un 0,6% de incorporación de zeolita presentó una menor susceptibilidad a la humedad y la mezcla con un 0,3% de incorporación de zeolita presentó un comportamiento similar a la mezcla patrón en cuanto a la disminución de resistencia ante la acción del agua.

5.3.4 Rigidez de la mezcla

Dentro de los efectos que se producen en la mezcla asfáltica al reducir su temperatura de mezclado, se encuentra una menor oxidación (envejecimiento) de la mezcla lo que a su vez provoca cambios en la rigidez. En este caso, las mezclas con zeolita se mostraron un poco más deformables que la mezcla patrón posiblemente debido al menor envejecimiento.

Esta menor oxidación experimentada por las mezclas con zeolita, tendría dos explicaciones. La primera explicación se relaciona con el hecho de que al presentar mayor densidad, los huecos de aire de las mezclas con zeolita también son menores y por ende la superficie asfáltica expuesta al oxígeno es menor. La segunda explicación radica en la menor temperatura de mezclado que disminuye los procesos de envejecimiento temprano del asfalto. En el caso de la MAC 0,3%, su menor envejecimiento se debe a la primera razón expuesta, mientras que el caso de las mezclas tibias con zeolita, el menor envejecimiento se presentaría por ambas razones.

La menor rigidez de las mezclas con zeolita a su vez queda expuesta ante los valores de fluencia obtenidos por ellas.

El hecho de que las mezclas con zeolita en general se hayan presentado como levemente más deformables que la mezcla patrón, indica que en general son más flexibles y eventualmente podrían presentar un mejor comportamiento ante fatiga y agrietamientos de origen térmico.

5.3.5 Deformaciones permanentes

Tomando en consideración lo anteriormente expuesto en cuanto a la rigidez y fluencia de las mezclas estudiadas, la condición de mayor flexibilidad y probablemente mayor ductilidad de las mezclas con zeolita, permite inferir que estas mezclas también podrían ser más susceptibles a sufrir deformaciones. No obstante, dado que las mezclas con zeolita también presentaron altos valores de estabilidad, es también cierto que podrían soportar grandes cargas antes de adquirir deformaciones permanentes. Aún así, es probable que en escenarios de alta temperatura ambiental y/o ante aplicaciones de cargas durante períodos de tiempo prolongado, la aparición de deformaciones plásticas se haga patente en mayor grado.

Por otro lado, estudios del tema [1,7,27] indican que la susceptibilidad a sufrir deformaciones permanentes no solo se relaciona con la condición de menor rigidez debido al menor envejecimiento del asfalto, si no que también con la menor temperatura de mezclado, que puede llevar a un secado incompleto de los áridos en procesos de espumado. Así, un adecuado proceso de curado que elimine la presencia de agua residual permitiría mejorar el comportamiento ante deformación plástica.

5.3.6 Contenido de asfalto

Como se indicó en la presentación de resultados, el diseño Marshall de la mezcla en caliente con un 0,3% de zeolita condujo a la obtención de un porcentaje óptimo de asfalto menor que el obtenido para la mezcla patrón, lográndose una reducción de un 0,2% en el contenido óptimo de asfalto al incorporar la zeolita. Esta reducción se debe los valores de la densidad y estabilidad obtenidos por la mezcla con zeolita que fueron significativamente mayores a los obtenidos por la mezcla patrón. Pero más aún, se relaciona con el porcentaje de asfalto necesario para producir un 5% de huecos de aire. Así, producto de la mayor trabajabilidad conferida por el micro espumado a la

mezcla, fue factible obtener una densidad que asegurara un porcentaje adecuado de huecos de aire con menos asfalto.

Es necesario señalar que en el caso de la MAC 0,3%, la absorción de asfalto por parte del árido debe ser la misma que la mezcla patrón debido a que ambas mezclas tuvieron la misma temperatura de mezclado y por ende el asfalto mantuvo una misma viscosidad. En este sentido, la cantidad de asfalto presente en ambas mezclas es la misma. No obstante, el aumento de volumen del asfalto en la mezcla con zeolita, por efecto del micro espumado, es lo que en definitiva produjo el aumento de densidad que se tradujo en reducción del porcentaje óptimo de asfalto. Consecuentemente, la posterior absorción de asfalto que el árido experimenta durante el largo plazo, debiera ser la misma que la mezcla patrón y causar los mismos efectos.

En el caso de las mezclas tibias con zeolita encontramos una situación diferente en cuanto al contenido de asfalto. Si bien a todas estas mezclas se les incorporó un 5% de asfalto con respeto al peso del árido pétreo, la menor temperatura de calentamiento del asfalto en las mezclas tibias con zeolita podría haber ocasionado una menor absorción de asfalto por parte del agregado mineral en estas mezclas ya que las viscosidades del asfalto en la etapa de producción de las mezclas tibias y caliente, no es la misma. Esta situación eventualmente ocasionaría que el asfalto útil fuera ligeramente mayor en las mezclas con zeolita. A su vez, esta situación podría inducir a calcular menores contenidos óptimos de asfalto para las mezclas tibias.

Otro aspecto interesante que fue observado en la mezcla en caliente con 0,3% de zeolita guarda relación con los valores de sus propiedades en el contenido asfáltico inmediatamente inferior al óptimo. En él se pudo observar que la MAC 0,3% presentó estabilidad, fluencia y propiedades volumétricas similares a la mezcla patrón pero con un 0,5% menos de asfalto.

Sin embargo, una disminución del contenido asfáltico en una mezcla en caliente o en una mezcla tibia, basada en mayores valores de densidad y estabilidad conferidos por la inclusión de zeolita, podría finalmente ser contraproducente ya que la absorción de asfalto por parte del árido en el largo plazo podría dejar a la mezcla con un contenido insuficiente de ligante en la superficie de las partículas de agregado mineral.

Finalmente, en el caso de reducciones en el contenido de asfalto en donde la posterior absorción del mismo por parte del árido no fuera significativa, se debe considerar que esto disminuiría a su vez las propiedades de estabilidad y densidad en comparación con el uso del porcentaje óptimo de asfalto. Por lo tanto, si se determina que las propiedades volumétricas y mecánicas de una mezcla con zeolita se mantienen en rangos aceptables, según las normativas vigentes, luego de hacer reducciones en su contenido de asfalto, sólo quedaría evaluar el comportamiento de la mezcla en el mediano y largo plazo. De momento, los resultados obtenidos en el diseño de la mezcla en caliente con incorporación de zeolita natural chilena (MAC 0,3%), en donde se evaluaron propiedades volumétricas y mecánicas en mezclas con porcentajes crecientes de asfalto, indican la factibilidad técnica de producir mezclas con menos asfalto que las convencionales en caliente.

6. Conclusiones y recomendaciones

A continuación se presentan los resultados y conclusiones más importantes que se han obtenido en la presente investigación. También se adjuntan recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas.

6.1 Conclusiones generales

La incorporación de zeolita natural chilena de clasificación Clinoptilolita-Mordenita permite reducir las temperaturas de mezclado y compactación de una mezcla asfáltica de graduación semidensa dado que produce un micro espumado capaz de aumentar el volumen de asfalto y facilitar la envoltura y cohesión de las partículas de agregado. Esta posibilidad quedó en evidencia tras la obtención de propiedades volumétricas y mecánicas iguales o mejores que las mezclas convencionales utilizadas como patrón de comparación.

En base a los resultados obtenidos en la densidad de las mezclas compactadas, se estimó que las mezclas con zeolita presentaron una mejora (aumento) en la trabajabilidad durante la etapa de mezclado ya que para una misma energía de compactación en todas las mezclas evaluadas, las mezclas con incorporación de zeolita presentaron densidades mayores en todos los casos, independiente de la temperatura de trabajo y el contenido asfáltico incorporado.

El aumento del volumen del asfalto por acción del micro espumado habría permitido en una primera etapa un recubrimiento mayor del árido y una disminución de la fricción entre partículas al ser estas recubiertas mas eficientemente por una película de asfalto espumado. Posteriormente, al menguar el efecto del agua en el asfalto, el ligante habría disminuido su volumen provocándose un efecto similar al aumento de viscosidad que a su vez cohesionó en forma mas efectiva los áridos que ya estaban recubiertos por una película de asfalto. La situación anterior ayudaría en el proceso de mezclado y posterior compactación.

En general, independientemente de la cantidad de zeolita incorporada y de las temperaturas de trabajo, las mezclas con zeolita obtuvieron menores contenidos de huecos de aire pero siempre dentro de los límites admisibles por la normativa chilena. Estos menores contenidos de V_a en las mezclas con zeolita pueden asociarse a mezclas de menor permeabilidad lo que asegura una menor exposición de la superficie asfáltica al agua y al oxígeno. Esta condición podría disminuir posibles problemas de *stripping* causados por el agua y ralentizar los procesos de envejecimiento del asfalto.

Por otro lado está el hecho de que las mezclas con zeolita, al producirse un micro espumado de agua, podrían mantener agua residual en el interior de vacíos, lo que en este caso sería una condición desfavorable ante los deterioros o fenómenos que se asocian a la presencia de agua en la mezcla. Se recomienda estudiar en investigaciones futuras los períodos y temperaturas necesarias para efectuar un proceso eficiente de curado de mezclas que incorporen zeolita natural chilena.

Las mezclas con zeolita se presentaron levemente más deformables que la mezcla patrón, indicando que en general son más flexibles y eventualmente podrían presentar un mejor comportamiento ante fatiga y agrietamientos de origen térmico.

Los resultados de las diversas propiedades volumétricas y mecánicas analizadas en las mezclas con zeolita, indican que estas mezclas siguen las tendencias generales en relación al comportamiento esperado de una mezcla asfáltica en caliente y a su vez los valores de las propiedades evaluadas se ajustan a las especificaciones requeridas por la normativa chilena. No obstante la incorporación de zeolita a las mezclas permite variar, disminuir o aumentar algunas de las propiedades que caracterizan a la mezcla. Estos resultados a su vez indican la factibilidad técnica de confeccionar mezclas asfálticas en caliente y mezclas asfálticas tibias con incorporación de zeolita natural chilena.

6.2 Conclusiones específicas

6.2.1 Mezcla en caliente con incorporación de 0,3% de zeolita

Los resultados obtenidos en esta etapa indican que al incorporar zeolita natural chilena (en adelante “zeolita”) a mezclas asfálticas en caliente, los parámetros volumétricos considerados por el método de diseño Marshall se ven potenciados, lográndose mejores valores en comparación con la mezcla sin zeolita, confeccionada como patrón evaluador.

En cuanto a la densidad, la mezcla en caliente con incorporación de zeolita en dosis de 0,3%, presentó mayor densidad en todos los contenidos asfálticos evaluados en comparación con la mezcla patrón, obteniendo un incremento de 1%, para el contenido asfáltico de 5%. Esto nos permite asegurar que la incorporación de zeolita a una mezcla asfáltica en caliente ayuda en el proceso de compactación al lograr mayores densidades que una mezcla en caliente tradicional que no posea algún tipo de aditivo. También podríamos esperar, a raíz de los resultados obtenidos, que una dosis adecuada de zeolita que aumente las densidades, podría disminuir la energía requerida en el proceso de compactación.

En relación a la estabilidad, la incorporación de zeolita a la mezcla también produjo un aumento en la resistencia a deformación plástica para todos los contenidos asfálticos evaluados, con un máximo incremento de estabilidad correspondiente a 16%, en el contenido asfáltico de 5%. Esto constituye una mejora importante introducida por el uso de zeolita en la mezcla en caliente dado que para un mismo contenido asfáltico en ambas mezclas analizadas, la que incorporó zeolita podría presentar un mejor comportamiento ante los esfuerzos, presentando una resistencia más alta a los desplazamientos y deformaciones inducidas por cargas de tránsito.

En lo concerniente al diseño de la mezcla en caliente con incorporación de zeolita en dosis de 0,3%, y en base al aumento en las propiedades antes mencionadas, la incorporación de zeolita a la mezcla asfáltica en caliente produjo una reducción de un 0,2% en el contenido óptimo de asfalto con respecto al óptimo de asfalto calculado para la mezcla patrón.

Por otro lado, en el contenido asfáltico de 4,5%, la mezcla con zeolita presentó mayor estabilidad en comparación con la mezcla patrón en el contenido asfáltico de 5%. A su vez, también se observó que los valores de fluencia y propiedades volumétricas de la mezcla con zeolita y contenido asfáltico de 4,5%, fueron muy similares a los obtenidos por la mezcla patrón en el contenido asfáltico de 5%. Estos resultados reafirman el hecho de que la incorporación de zeolita a una mezcla asfáltica en caliente permitiría reducir los contenidos de asfalto necesarios para obtener mezclas que presenten comportamientos y desempeño equivalente a las mezclas en caliente convencionales. Sin embargo, es necesario realizar nuevos estudios que permitan evaluar la incorporación de zeolita natural chilena a mezclas asfálticas en caliente en donde se analicen otras propiedades consideradas por otros métodos de diseño que complementen y amplíen lo observado en este estudio.

Para todos los contenidos asfálticos evaluados, la mezcla con zeolita presentó menores contenidos de huecos de aire y vacíos en el agregado mineral. Estas disminuciones se hicieron más notorias en el contenido asfáltico de 5%, donde la mezcla presentó una reducción de 0,9% en el caso del VAM y 1% en los Va. Pero en ambos casos los valores de estas propiedades cumplen con los parámetros exigidos por la normativa chilena.

En relación a la fluencia, ambas mezclas evaluadas mostraron deformación similar lo que indica que la mezcla con zeolita, aun cuando obtuvo mayor estabilidad que la mezcla patrón, se deformó según lo esperado y dentro de los límites permitidos por la normativa chilena.

Si bien la incorporación de zeolita a la mezcla produjo variaciones en los valores obtenidos de las propiedades volumétricas y mecánicas analizadas, la incorporación de zeolita no altera las tendencias habituales que se observan en las mezclas en caliente convencionales, en relación al contenido de asfalto y las propiedades de la mezcla. De este modo, tanto en la mezcla patrón como en la con incorporación de zeolita se pudieron observar las siguientes tendencias:

- El porcentaje de huecos de aire disminuyó a medida que aumentó el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) disminuyó hasta un valor mínimo, y luego aumentó con aumentos en el contenido de asfalto.

- El porcentaje de vacíos llenos de asfalto (V_{LL}) aumentó con aumentos en el contenido de asfalto.
- La curva para la densidad fue similar a la curva de estabilidad.
- Hasta cierto punto, los valores de estabilidad aumentaron a medida que el contenido de asfalto también aumentó. Esto hasta un punto máximo luego del cual la estabilidad disminuyó con el aumento en el contenido de asfalto.
- Los valores de fluencia aumentaron con aumentos en el contenido de asfalto.

6.2.2 Mezclas tibias con incorporación de zeolita

6.2.2.1 Propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia

Pese a la reducción de las temperaturas de trabajo de estas mezclas, todas las mezclas tibias con incorporación de zeolita presentaron densidades mayores que las mezclas sin zeolita. Para las mezclas con 0,6% y 1% de zeolita no se registraron diferencia estadísticamente significativa entre sus promedios. No obstante presentaron mayor densidad que la mezcla patrón. Por su parte, la mezcla con un 0,3% de zeolita obtuvo el mayor valor de densidad logrando un incremento de un 0,7% con respecto a la mezcla patrón. Estos resultados indican que el efecto del micro espumado tras la incorporación de zeolita natural chilena a la mezcla asfáltica, efectivamente produjo un pequeño aumento de la densidad aún cuando estas mezclas fueron compactadas a una temperatura de 25 °C menos. La mejora en la trabajabilidad que produciría la incorporación de la zeolita, es apoyada por el hecho de que para la misma energía de compactación las mezclas con zeolita muestran una mayor densificación en comparación con la mezcla patrón a pesar de la reducción en la temperatura de compactación.

La mayor densidad mostrada por las mezclas con zeolita produjo que éstas presentaran una ligera disminución en los porcentajes de VAM. No obstante, todas las mezclas presentaron valores por sobre el 14% exigido como mínimo por la normativa chilena. Así, las mezclas con 0,6% y 1% de zeolita disminuyeron los vacíos en el agregado mineral en un 0,4% con respecto a la mezcla patrón, y la mezcla con 0,3% de zeolita presentó una disminución de 0,6% en el porcentaje de VAM

Las mezclas con incorporación de zeolita en dosis de 0,6% y 1%, obtuvieron menores contenidos de huecos de aire que la mezcla patrón, disminuyendo sus respectivos V_a en un rango de 0,4% a 0,5%. Por su parte la mezcla con 0,3% de zeolita, dada su mayor densidad, presentó el menor contenido de huecos de aire mostrando una reducción de 0,7% con respecto a la mezcla patrón.

La menor temperatura a la que es calentado el asfalto en las mezclas con zeolita podría haber ocasionado una menor absorción de asfalto por parte del agregado mineral en estas mezclas ya que las viscosidades del asfalto en la etapa de producción de las mezclas tibias y calientes, no es la misma. Esta situación eventualmente ocasionaría que el asfalto útil fuera ligeramente mayor en las mezclas con zeolita. A su vez, los mayores porcentajes de huecos llenos de asfalto (V_{LL}) se presentan para las mezclas con zeolita que poseen menores porcentajes de vacíos en el agregado mineral.

Las mezclas tibias con incorporación de zeolita obtuvieron igual o mayor estabilidad que la mezcla patrón, no observándose en ellas los efectos de la disminución de las temperaturas de trabajo que si se verificaron en la mezcla tibia sin zeolita que presentó una disminución de 13% en su valor de estabilidad con respecto a la mezcla patrón. La mezcla con un 1% de zeolita presentó la misma estabilidad que la mezcla patrón, mientras que las mezclas con 0,3% y 0,6% de zeolita incrementaron su resistencia a deformación plástica hasta en un 6,2% en el caso de la mezcla con 0,3% de zeolita.

Las mezclas con zeolita mostraron una cantidad de fluencia decreciente a medida que se aumentó el contenido de zeolita. Por otra parte, al cotejar los valores de fluencia con los valores de estabilidad de las mezclas con zeolita, se aprecia que la mezcla con mayor estabilidad también es la más deformable, y que al aumentar la dosis de zeolita incorporada, las mezclas mostraron menor estabilidad y mayor rigidez. En general, a excepción de la mezcla con 1% de zeolita, todas las mezclas tibias presentaron más fluencia que la mezcla patrón y por ende se asume que son mezclas más flexibles y dúctiles. Esto puede deberse a que sufrieron menos oxidación por el hecho de haber sido mezcladas y compactadas a menor temperatura.

También es importante notar que la menor temperatura a la que es calentado el asfalto en las mezclas con zeolita se relaciona con menores oxidaciones del ligante lo cual disminuye los procesos de envejecimiento del asfalto y evita la rigidización prematura que hace a la mezcla más susceptible a los agrietamientos.

6.2.2.1 Ensayos de Tracción Indirecta (ITS)

En los resultados obtenidos en las mezclas tibias con zeolita no se observó una correlación directa entre los valores de la densidad y los valores de ITS seco.

Las mezclas con 0,3% y 0,6% de zeolita presentaron un 18% menos resistencia en estado seco con respecto a la mezcla patrón, mientras que la mezcla con 1% de zeolita incorporada obtuvo 9% menos. Parte de esta disminución podría deberse a la menor temperatura de mezclado y compactación de las mezclas tibias, no obstante, es interesante destacar que en esta condición de ensaye quedó en evidencia que a mayor contenido de zeolita se obtuvo una mejor respuesta de las mezclas ante la tracción indirecta, notándose que las mezclas con zeolita en todos los casos resistieron más que la mezcla tibia sin zeolita. Por otro lado, es posible encontrar una relación en la fluencia de las mezclas con zeolita y su resistencia a tracción indirecta en estado seco. Así, dados los resultados obtenidos, podemos inferir que de entre las mezclas con zeolita aquellas que se presentaron más deformables tuvieron un menor valor de ITS en estado seco.

Los resultados de estabilidad mostraron una disminución de esta propiedad en la mezcla con un 1% de zeolita, posiblemente debido a la presencia de agua residual que habría afectado la cohesión y provocado algunas dificultades con la adherencia del asfalto en la superficie del árido.

Sin embargo, al contrario de lo observado en la estabilidad, la resistencia a tracción indirecta en estado seco fue mayor a medida que se aumentó el contenido de zeolita. Esta diferencia podría radicar en el distinto proceso de acondicionamiento de las probetas previo a los ensayos. Estas diferencias en los procesos de acondicionamiento de las probetas de ensaye podrían cosechar diferencias en la eliminación de agua residual en la mezcla. Así, el mayor valor de ITS seco presentado por la mezcla con 1% de zeolita, nos indica que el efecto de la eliminación de agua residual fue más significativo para ella que para las otras mezclas con zeolita.

En cuanto a la resistencia a tracción indirecta en estado de saturación, las mezclas con zeolita mostraron una mayor sensibilidad a la humedad que la mezcla patrón, no verificándose diferencias estadísticamente significativas entre ellas. El porcentaje de disminución en el valor de ITS saturado de las mezclas con zeolita fluctúa entre 15% a 18% con respecto a la mezcla patrón. No obstante, también en este caso la mezcla tibia sin zeolita presentó el menor valor con una disminución de 33% en su resistencia a tracción indirecta con respecto a la MAC Patrón.

Todas las mezclas, independientemente de la temperatura de compactación y dosis de zeolita incorporada, redujeron su resistencia a tracción indirecta bajo condiciones de saturación en agua. Sin embargo, los porcentajes de resistencia a tracción retenida indican que la mezcla con 0,6% de zeolita es la menos sensible a los efectos del humedecimiento. Por su parte, la MAC Patrón y la Mezcla 0,3%, obtuvieron el mismo porcentaje de TSR y a su vez muy similar al obtenido por la mezcla con 0,6% de zeolita. Finalmente, las mezclas que se mostraron más susceptibles al efecto del agua fueron la Mezcla 0% y la Mezcla 1%, con una reducción en sus respectivas resistencias a tracción indirecta de 21% y 18%, respectivamente.

6.3 Recomendaciones y futuras líneas de investigación

En función a los resultados obtenidos en la presente investigación, las conclusiones anteriormente expuesta y considerando futuras líneas de investigación, se presentan a continuación una serie de recomendaciones con la intención de orientar de quienes decidan tomar como referencia éste documento.

- Dado que el microespumado inducido por la zeolita causa efectos en la trabajabilidad de las mezclas, en esta investigación se prestó interés a la trabajabilidad de las mezclas en base a la relación que existe entre ella y la compactación lograda para una misma energía de compactación. Se recomienda que se complemente esta investigación estudiando más a fondo la trabajabilidad de las mezclas con zeolita en la etapa de mezclado y extendido, a través de equipamiento mecánico en donde pueda medirse el torque necesario para mantener una velocidad giratoria de paletas dentro de una mezcla suelta a una temperatura dada.
- Esta investigación contempló en sus dos etapas experimentales mantener como única variable el contenido de zeolita de tal forma que los resultados de posibles variaciones en las propiedades analizadas fueran atribuibles a la acción de la zeolita en la mezcla asfáltica. Sería de utilidad analizar el comportamiento de las mezclas con zeolita variando a su vez otros factores de influencia en el desempeño de la mezcla de tal manera de analizar interacciones entre factores.
- Estudiar otras propiedades de mezclas asfálticas que se relacionen también con su rendimiento teórico y con parámetros de diseño estructural.
- Realizar estudios más detallados a la zeolita que permitan caracterizarla de tal manera que se obtenga más información de su comportamiento. Entre estos estudios se encuentra el análisis de poros, y la determinación de curvas de adsorción - desorción.
- Estudiar el comportamiento de mezclas con incorporación de zeolita en otros rangos de temperatura, con otras granulometrías y otros contenidos de incorporación de zeolita.
- Generar especificaciones técnicas en relación al diseño y análisis de mezclas con incorporación de zeolita.
- Realizar experimentos con probetas de mezclas asfálticas con zeolita que hayan sido sometidas a diversos procesos de curado, contemplando como factores influyentes el tiempo y la temperatura del proceso.
- Ejecutar tramos de prueba con mezclas en caliente y tibias, con incorporación de zeolita.

Referencias bibliográficas

- [1] M. Zaumanis, "Warm Mix Asphalt Investigation", Master of Science Thesis, Department of Civil Engineering, University of Denmark, Kongens Lyngby, Dinamarca, 2010.
- [2] D. Newcomb, "An introduction to Warm Mix Asphalt", National Asphalt Pavement Association, EE.UU., 2007.
- [3] M. Von Devivere; W. Barthel; J. Marchand, "Warm Asphalt Mixes by adding Aspha - Min®, a synthetic zeolite", [Online] Eurovia GmbH. [Consultada: 6 Enero 2017.] <http://www.aspha-min.com>
- [4] European Asphalt Pavement Association, "The use of Warm Mix Asphalt" EAPA position paper The use of Warm Mix Asphalt – January 2010.
- [5] R. Estévez. "Entendiendo los objetivos del desarrollo sostenible," *Ecointeligencia* [Online], vol. 1, no. 1, Dic. 2016, <http://www.ecointeligencia.com>
- [6] S. Galáz, "Efecto de la incorporación de zeolita natural chilena en la temperatura de producción de mezclas asfálticas", Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, 2011.
- [7] J. D'Angelo [et al], "Warm-mix asphalt: European practice", International Technology scanning program, FHWA, AASHTO, NCHRP. Report no. FHWA PL-08-007, Alexandria, EE.UU., 2008.
- [8] J. Croteau, B. Tessier, "An overview of warm mix asphalt paving technologies", 2009.
- [9] Button, J. W., Wimsatt, A. and Estakhri, C., A synthesis of warm-mix asphalt. FHWA/TX-07/0-5597-1. Texas Transportation Institute-Texas A&M University, College Station, TX, 2007
- [10] E. Sánchez [et al], "Efecto de los aditivos tibios sobre la formación de ahuellamiento y comportamiento a fatiga en mezclas de asfalto", Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Cantabria, Cantabria, España, 2014.
- [11] B. Sengoz, "Evaluación de la zeolita natural como aditivo a mezcla de asfalto tibio y su comparación con otros aditivos de mezcla tibía", Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Eylul, Izmir, Turquía, 2013.
- [12] A. Vaitkus [et al], "Analysis and evaluation of possibilities for the use of Warm Mix Asphalt in Lithuania", The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2009.
- [13] N. Bueche, "Warm Asphalt Bituminous Mixtures with regards to energy, emissions and performance," Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Road Transport Conference, Session 8.
- [14] J. D'Angelo [et al], "Warm - Mix Asphalt: European Practice," European Tour FHWA, American Trade Initiatives, 2007.
- [15] Dirección de Vialidad, MOP. 2017. Manual de Carreteras, Volumen 4, *Planos de obras tipo*. Santiago, Chile.
- [16] Dirección de Vialidad, MOP. 2017. Manual de Carreteras, Volumen 5, *Especificaciones técnicas generales de construcción*. Santiago, Chile.

- [17] Ministerio de Vivienda y Urbanismo. 2016. *Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación*. Santiago, Chile.
- [18] R. Orellana, "El futuro de la industria del asfalto está garantizado por muchos años", Ediciones Especiales El Mercurio, pp.1-8.
- [19] Asphalt Institute, *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfálticas en caliente*, EE.UU.: Áspala Institute, 2001.
- [20] Dirección de Vialidad, MOP. 2017. Manual de Carreteras, Volumen 8, *Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control*. Santiago, Chile
- [21] O. Kristjansdottir, "Warm mix asphalt for cold weather paving," Tesis para optar al grado de Master of Science in Civil Engineering, University of Washington, 2006.
- [22] Al - Rawashdeh A.S., "Performance Assessment of Warm Mix Asphalt (WMA) Pavements," A Master of Science Thesis, Rus College of Engineering and Technology, Ohio University, 2008.
- [23] K. Muthen, "Foamed Asphalt Mixes: Mix Design Process". Contract report. SABITA Ltd & CSIR Transportek, 1998.
- [24] K.J Jenkins [et al], "Half - warm foamed bitumen treatment, a new process". 7th Conference on asphalt pavements for Southern Africa, 1999.
- [25] O.R. Larsen, "Warm Asphalt Mix with Foam – WAMFoam," Kolo Veidekke, 2001.
- [26] G.C Hurley; B.D Prowell, "Evaluation of Aspha - Min® Zeolite for use in warm mix asphalt," Auburn: National Center for Asphalt Technology. Report 05-04, 2005.
- [27] G.C Hurley,B.D Browell, "Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt," Auburn: National Center for Asphalt Technology. Report 05- 06. análisis and evaluation of possibilities for the use of Warm Mix Asphalt in Lithuania. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. Vilnius Gediminas Technical University, 2005.
- [28] German Asphalt Paving Association, "Warm Mix Asphalts," Elke Schlüter communication agency, Alfter, 2005.
- [29] G.L. Fitts, "Warm Mix Asphalt," Asphalt Institute Conference, Texas, 2009.
- [30] T Butz, "Warm Asphalt Mix – Technologies," Research and Experience. SasolWax GmbH, 2005
- [31] A. Chowdhury; J.W. Button, J.W., "A review of warm mix asphalt". Texas Transportation Institute – Technical Report, 2008.
- [32] A Smith, "Advera WMA Zeolite," WMATEchnical Working Group. Presentation at December 12, 2007.
- [33] W Jones, "Warm Mix Asphalt Pavements: Technology of the future?," Asphalt Institute Magazine, 2004.
- [34] Aspha - Min. Página web del producto. [Online] Eurovia GmbH. [Consultada: 6 Febrero 2017.] <http://www.aspha - min.com/>

- [34] M Corrigan, "Warm mix asphalt technology," Aashto standing committee on highways technical meeting, 2005.
- [35] Advera. Página web del producto. [Online] PQ Corporation. [Consultada: 13 Febrero 2017.] <http://www.adverawma.com/>
- [36] A:H. Englert; J.Rubio, "Characterization and environmental application of a Chilean natural zeolite," International Journal of Mineral Processing, 2004.
- [37] H. Ghobarkar, G.; Schiif; U. Guth, "Zeolites – From kitchen to space" Prog. Solid St. Chem. Vol. 27, pp. 29-73, 1999.
- [38] T.T. Olgúin, "Zeolitas: Características y propiedades. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Depto. de Química. México, 2001.
- [39] Morales C. [et al], *Anuario de la Minería de Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Planificación, Control de Gestión y Estudios. Santiago, Chile, 2015
- [40] J.W. Button, C. Estakhri, A. Wimsatt, "A synthesis of Warm - Mix Asphalt" Texas Transportation Institute. Technical Report, 2006.
- [41] Z. You [et al], "Laboratory evaluation and pavement design of warm mix asphalt," Proceedings of the 2007 Mid - Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, August 2007
- [42] K. Anderson [et al], "Warm Mix Asphalt Final Report." Experimental Features WA 08- 01, Washington Department of Transportation, 2014.
- [43] T Aschenbrener [et al], "Three Year Evaluation of the Colorado Department of Transportation's Warm Mix Asphalt Experimental Feature on I-70 at Silverthorne, Colorado." Colorado Department of Transportation, 2011.
- [44] H. Wang [et al], "HMA Pay Adjustment." Report FHWA NJ- 2015-007. New Jersey Department of Transportation, 2015.
- [45] D.C. Brown, "Warm Mix: The lights are green" Hot mix Asphalt Technology-January / February 2008. pp20 - 32.
- [46] J. A Epps [et al], "Recommended Performance-Related Specifications for Hot-Mix Asphalt Construction: Results of the WestTrack Project." NCHRP Report 455, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2002.
- [47] Z. You; S.W., "Laboratory evolution of warm mix asphalt: a preliminary study". International Journal of Pavement Research and Technology, 2008.
- [48] G.C Hurley and B.D Browell, "Evaluation of potential processes for use in Warm Mix Asphalt," Auburn: National Center for Asphalt Technology, 2005.
- [49] P. Blankenship and R.M. Anderson, "Laboratory Investigation of HMA Modulus, Flow Number and Flexural Fatigue on Samples of Varying Density." Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 79, pp. 497-518, 2010.

Anexos

Anexos A

Anexo A1: Deshidratación en horno de muestras de zeolita tamaño 0,15 mm a diversas temperaturas

Tiempo (min)	110° C				135° C			
	Mediciones (g)	Dif. de peso entre muestras (g)	% de disminución peso	% acumulado peso	Mediciones (g)	Dif. de peso entre muestras (g)	% de disminución peso	% acumulado peso
0	20,0000	0	0	0	20,0000	0	0	0
5	19,0340	0,9660	59,25	59,25	19,0275	0,9725	59,65	59,65
10	18,7682	0,2658	16,30	75,55	18,7545	0,2730	16,74	76,39
15	18,6641	0,1041	6,38	81,93	18,6452	0,1093	6,70	83,09
20	18,5974	0,0667	4,09	86,02	18,5754	0,0698	4,28	87,37
25	18,5325	0,0649	3,98	90,00	18,5079	0,0675	4,14	91,51
30	18,4973	0,0352	2,16	92,16	18,4709	0,0370	2,27	93,78
35	18,4710	0,0263	1,61	93,77	18,4461	0,0248	1,52	95,30
40	18,4423	0,0287	1,76	95,54	18,4182	0,0279	1,71	97,02
45	18,4212	0,0211	1,29	96,83	18,3976	0,0206	1,26	98,28
50	18,3955	0,0257	1,58	98,41	18,3720	0,0255	1,57	99,85
55	18,3780	0,0175	1,07	99,48	18,3630	0,0090	0,55	100,40
60	18,3755	0,0025	0,15	99,63	18,3625	0,0005	0,03	100,43
70	18,3723	0,0032	0,20	99,83	18,3622	0,0003	0,02	100,45
80	18,3695	0,0028	0,17	100,00	18,3618	0,0004	0,02	100,47
90	18,3695	0,0000	0,00	100,00	18,3619	-0,0001	-0,01	100,46
Dif. de Peso	1,6305				Dif. de Peso	1,6381		
% Agua	8,88				% Agua	8,92		

Tiempo (min)	165° C			
	Dif. De peso entre mediciones	Dif. de peso entre muestras (g)	% de disminución peso	% acumulado peso
0	20,0000	0	0	0
5	19,0219	0,9781	59,99	59,99
10	18,7454	0,2766	16,96	76,95
15	18,6326	0,1127	6,91	83,86
20	18,5592	0,0734	4,50	88,36
25	18,4891	0,0701	4,30	92,66
30	18,4499	0,0393	2,41	95,07
35	18,4214	0,0284	1,74	96,81
40	18,3922	0,0292	1,79	98,61
45	18,3711	0,0211	1,29	99,90
50	18,3536	0,0175	1,08	100,98
55	18,3442	0,0093	0,57	101,55
60	18,3417	0,0025	0,15	101,70
70	18,3415	0,0003	0,02	101,72
80	18,3387	0,0028	0,17	101,89
90	18,3388	-0,0001	-0,01	101,88
Dif. de Peso	1,6612			
% Agua	9,06			

Anexo A2: Hidratación en ambiente de laboratorio de muestras deshidratadas de zeolita tamaño 0,15 mm

Tiempo (Hrs.)	Mediciones (g)	Dif. de peso entre muestras (g)	% de disminución	% acumulado
0	18,3695	0	0	0
0,5	18,7625	0,3930	24,04	24,04
1	19,0788	0,3163	19,35	43,39
1,5	19,3216	0,2428	14,85	58,24
2	19,5448	0,2232	13,65	71,89
2,5	19,7183	0,1735	10,61	82,51
3	19,8607	0,1424	8,71	91,22
3,5	19,9311	0,0704	4,31	95,52
4	19,9688	0,0377	2,30	97,83
4,5	19,9797	0,0109	0,67	98,50
5	19,9879	0,0082	0,50	99,00
5,5	19,9952	0,0073	0,45	99,44
6	20,0003	0,0051	0,31	99,75
6,5	20,0036	0,0033	0,20	99,96
7	20,0041	0,0005	0,03	99,99
7,5	20,0044	0,0003	0,02	100,01
8	20,0043	-0,0001	-0,01	100,00
Dif. de Peso	1,6348			
% Agua	9,54			

Anexos B

En esta sección de anexos se presentan las tablas con los valores de cada una de las mediciones y ensayos realizados a las probetas confeccionadas. Se muestran los valores correspondientes a densidad, propiedades volumétricas, estabilidad, fluencia y resistencia a tracción indirecta de cada probeta ensayada según tipo de mezcla, contenido de asfalto y contenido de zeolita, según sea el caso.

Anexo B2: Valores de estabilidad y fluencia de la mezcla patrón (MAC Patrón)

ASFALTO %	PROBETA N°	Lectura Instrumento	Ajuste Lectura (KN)	Factor corrección	ESTABILIDAD (KN)	FLUENCIA (0,01")	Fluencia (mm)
4,00%	1	335	14,059	1,011	14,214	9,5	2,4
	2	340	14,266	1,032	14,723	10,0	2,5
	3	357	14,972	1,019	15,256	10,5	2,7
					14,731	10,0	
4,50%	1	340	14,266	1,032	14,723	11,0	2,8
	2	336	14,100	1,032	14,552	10,0	2,5
	3	360	15,096	1,049	15,836	11,5	2,9
					15,037	10,8	
5,00%	1	343	14,391	1,029	14,808	11,0	2,8
	2	364	15,262	1,049	16,010	10,0	2,5
	3	346	14,515	1,062	15,415	12,0	3,0
					15,411	11,0	
5,50%	1	357	14,972	1,043	15,616	13,0	3,3
	2	344	14,432	1,021	14,735	11,0	2,8
	3	299	12,565	1,184	14,877	12,0	3,0
					15,076	12,0	
6,00%	1	325	13,644	1,049	14,312	12,0	3,0
	2	316	13,270	1,016	13,483	11,5	2,9
	3	337	14,142	1,071	15,146	13,0	3,3
					14,314	12,2	

Anexo B3: Valores de VAM, Va y V_{LL} de la mezcla patrón (MAC Patrón)

Asfalto (%)	PROBETA N°	ESTABILIDAD (KN)	FLUJENCIA (0,01") (0,25 mm)	Fluencia (mm)	DENSIDAD (Kg/m ³)	VAM (%)	Va (%)	Huecos llenos de Asfalto (%)	Asfalto Útil (%)	Asfalto Útil (g)
4,0%	1	14,214	9,5	2,41	2306,0	15,84	7,79	50,84		
	2	14,723	10,0	2,54	2308,7	15,75	7,68	51,21		
	3	15,256	10,5	2,67	2305,9	15,85	7,79	50,82		
		14,731	10,0	2,54	2306,9	15,81	7,76	50,95	3,70	40,74
4,5%	1	14,723	11,0	2,79	2321,8	15,67	6,51	58,44		
	2	14,552	10,0	2,54	2318,3	15,80	6,66	57,88		
	3	15,836	11,5	2,92	2313,5	15,98	6,85	57,13		
		15,037	10,8	2,75	2317,9	15,82	6,67	57,82	4,20	46,24
5,0%	1	14,808	11,0	2,79	2331,8	15,71	5,47	65,20		
	2	16,010	10,0	2,54	2336,8	15,53	5,27	66,09		
	3	15,415	12,0	3,05	2331,3	15,73	5,49	65,10		
		15,411	11,0	2,79	2333,3	15,66	5,41	65,47	4,70	51,74
5,5%	1	15,616	13,0	3,30	2353,9	15,32	3,93	74,33		
	2	14,735	11,0	2,79	2355,4	15,26	3,87	74,65		
	3	14,877	12,0	3,05	2354,3	15,30	3,91	74,42		
		15,076	12,0	3,05	2354,6	15,29	3,91	74,47	5,20	57,24
6,0%	1	14,312	12,0	3,05	2336,8	16,33	4,00	75,52		
	2	13,483	11,5	2,92	2338,6	16,27	3,93	75,87		
	3	15,146	13,0	3,30	2339,8	16,22	3,87	76,11		
		14,314	12,2	3,09	2338,4	16,27	3,93	75,83	5,70	62,74

Anexo B4: Valores de densidad real de probetas compactadas (DRC) correspondientes al diseño de la mezcla en caliente con incorporación de 0,3% de zeolita (MAC 0,3%)

CONTENIDO ASFALTO	PROBETA N°	ALTURAS (mm)				Altura Prom. (mm)	A		C		B		Aab ≤ 2		G	
		1	2	3	4		Masa Seca (gr)	Masa Sumergida (gr)	Masa SSS (gr)	% Agua Absorbida	DRC (Kg/m ³)					
4,0%	1	62,5	62,6	62,4	62,3	62,4	1138,6	656,1	1147,9	1,891	2315,2					
	2	63,4	63,6	63,5	63,4	63,4	1137,0	654,1	1146,0	1,830	2311,4					
	3	62,9	62,7	62,7	62,7	62,7	1138,6	655,1	1147,5	1,807	2312,3					
										1,843	2313,0					
4,5%	1	62,4	62,1	62,0	62,1	62,1	1138,2	653,9	1143,2	1,022	2326,2					
	2	62,7	62,8	62,6	62,8	62,7	1138,2	654,9	1143,2	1,024	2330,9					
	3	60,8	60,7	60,8	60,9	60,8	1139,2	655,9	1144,2	1,024	2333,0					
										1,023	2330,0					
5,0%	1	61,1	61,2	61,2	61,1	61,1	1144,8	660,4	1146,4	0,329	2355,6					
	2	61,4	61,7	61,6	61,3	61,5	1145,2	662,4	1147,5	0,474	2360,8					
	3	61,4	61,3	61,0	61,2	61,2	1144,0	661,2	1145,9	0,392	2360,2					
										0,398	2358,8					
5,5%	1	62,2	61,8	61,9	62,2	62,0	1148,0	664,0	1150,6	0,534	2359,2					
	2	61,8	62,0	61,9	61,6	61,8	1146,7	663,4	1149,5	0,576	2359,0					
	3	61,2	61,1	60,9	60,9	61,0	1147,9	664,7	1150,6	0,556	2362,4					
										0,555	2360,2					
6,0%	1	60,7	60,9	60,7	60,7	60,7	1148,0	661,0	1150,6	0,531	2344,8					
	2	61,2	61,5	61,0	60,7	61,1	1141,0	656,2	1142,9	0,390	2344,4					
	3	61,7	61,5	61,6	61,8	61,6	1150,5	663,4	1151,2	0,144	2358,5					
										0,355	2349,2					

Anexo B5: Valores de estabilidad y fluencia de la mezcla en caliente con incorporación de 0,3% de zeolita (MAC 0,3%)

ASFALTO %	PROBETA N°	Lectura Instrumento	Ajuste Lectura (KN)	Factor corrección	ESTABILIDAD (KN)	FLUENCIA (0,01")	Fluencia (mm)
4,0%	1	377	15,802	1,029	16,260	12,5	3,2
	2	359	15,055	1,003	15,100	11,5	2,9
	3	327	13,727	1,021	14,015	11,0	2,8
					15,125	11,7	3,0
4,5%	1	369	15,470	1,037	16,042	11,5	2,9
	2	388	16,258	1,021	16,600	11,0	2,8
	3	381	15,968	1,078	17,213	13,0	3,3
					16,619	11,8	3,0
5,0%	1	404	16,922	1,068	18,073	13,0	3,3
	2	404	16,922	1,056	17,870	13,5	3,4
	3	396	16,590	1,065	17,669	12,5	3,2
					17,871	13,0	3,3
5,5%	1	401	16,798	1,040	17,470	13,5	3,4
	2	373	15,636	1,046	16,355	12,0	3,0
	3	376	15,760	1,071	16,879	12,5	3,2
					16,901	12,7	3,2
6,0%	1	346	14,515	1,081	15,691	13,0	3,3
	2	338	14,183	1,068	15,148	12,5	3,2
	3	333	13,976	1,053	14,717	12,0	3,0
					15,185	12,5	3,2

Anexo B6: Valores de VAM, Va y V_{LL} de la mezcla en caliente con incorporación de 0,3% de zeolita (MAC 0,3%)

Asfalto (%)	PROBETA N°	ESTABILIDAD (KN)	8 a 16		min. 14 4 a 6 (3-8)				Asfalto Útil (%)	Asfalto Útil (g)
			FLUENCIA (0,01") (0,25 mm)	FLUENCIA (mm)	DENSIDAD (Kg/m3)	VAM (%)	Va (%)	Huecos llenos de Asfalto (%)		
4,0%	1	16,260	12,50	3,18	2315,2	15,51	7,42	52,14		
	2	15,100	11,50	2,92	2311,4	15,65	7,57	51,60		
	3	14,015	11,00	2,79	2312,3	15,61	7,54	51,73		
		15,125	11,7	2,96	2313,0	15,59	7,51	51,82	3,70	40,74
4,5%	1	16,042	11,50	2,92	2326,2	15,51	6,34	59,15		
	2	16,600	11,00	2,79	2330,9	15,34	6,15	59,94		
	3	17,213	13,00	3,30	2333,0	15,27	6,06	60,29		
		16,619	11,8	3,01	2330,0	15,37	6,18	59,79	4,20	46,24
5,0%	1	18,073	13,00	3,30	2355,6	14,85	4,51	69,66		
	2	17,870	13,50	3,43	2360,8	14,67	4,30	70,71		
	3	17,669	12,50	3,18	2360,2	14,69	4,32	70,60		
		17,871	13,0	3,30	2358,8	14,74	4,37	70,33	4,70	51,74
5,5%	1	17,470	13,50	3,43	2359,2	15,13	3,71	75,44		
	2	16,355	12,00	3,05	2359,0	15,14	3,72	75,39		
	3	16,879	12,50	3,18	2362,4	15,01	3,58	76,12		
		16,901	12,7	3,22	2360,2	15,09	3,67	75,65	5,20	57,24
6,0%	1	15,691	13,00	3,30	2344,8	16,04	3,67	77,12		
	2	15,148	12,50	3,18	2344,4	16,06	3,69	77,03		
	3	14,717	12,00	3,05	2358,5	15,55	3,11	80,03		
		15,185	12,5	3,18	2349,2	15,88	3,49	78,06	5,70	62,74

Anexo B7: Valores de densidad real de probetas compactadas (DRC) de las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias) utilizadas en el ensayo de estabilidad y fluencia

MEZCLA	PROB. N°	ALTURAS (mm)				Altura Prom. (mm)	A		C	B	Aab ≤ 2 % Agua Absorvida	G
		1	2	3	4		Masa Seca (gr)	Masa Sumergida (gr)				
Mezcla 0%	1	62,20	62,15	62,10	62,20	62,2	1144,1	656,6	1148,2	0,834	2327,3	
	2	62,25	61,90	61,60	61,70	61,9	1145,6	657,7	1148,9	0,672	2332,2	
	3	62,50	62,65	62,95	63,00	62,8	1143,7	659,0	1150,0	1,283	2329,3	
	4	61,35	61,35	61,35	61,30	61,3	1145,2	657,1	1149,1	0,793	2327,6	
	5	62,50	62,65	62,95	62,00	62,5	1146,5	658,1	1152,0	1,114	2321,3	
										0,939	2327,6	
Mezcla 0,3%	1	62,45	62,50	62,20	61,85	62,3	1138,5	655,8	1140,6	0,433	2348,4	
	2	61,95	61,95	61,85	61,70	61,9	1142,5	660,0	1145,6	0,638	2352,8	
	3	61,50	61,30	61,10	61,15	61,3	1137,1	656,3	1140,0	0,600	2350,8	
	4	60,65	60,50	60,60	60,90	60,7	1138,0	654,7	1139,3	0,268	2348,3	
	5	61,50	61,55	61,50	61,40	61,5	1143,2	658,9	1144,8	0,329	2352,7	
										0,454	2350,6	
Mezcla 0,6%	1	62,20	61,95	61,95	62,20	62,1	1146,7	661,3	1151,4	0,959	2339,7	
	2	60,50	60,50	60,35	60,45	60,5	1141,0	656,8	1144,3	0,677	2340,5	
	3	61,50	61,50	61,35	61,50	61,5	1144,5	659,2	1147,0	0,513	2346,2	
	4	61,20	61,55	61,40	61,35	61,4	1139,7	655,5	1141,9	0,452	2343,1	
	5	62,30	62,15	62,10	62,25	62,2	1142,0	657,3	1144,6	0,534	2343,5	
										0,627	2342,6	
Mezcla 1%	1	61,70	61,60	61,40	61,45	61,5	1148,9	660,7	1150,8	0,388	2344,2	
	2	62,00	62,00	61,85	61,80	61,9	1143,9	658,6	1146,3	0,492	2345,5	
	3	61,55	61,45	61,25	61,30	61,4	1142,2	658,0	1144,5	0,473	2347,8	
	4	61,35	61,45	61,25	61,10	61,3	1145,1	657,6	1146,7	0,327	2341,2	
	5	62,85	62,65	62,50	62,70	62,7	1142,9	660,3	1147,0	0,842	2348,3	
										0,504	2345,4	

Anexo B8: Valores de estabilidad y fluencia de las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias)

MEZCLA	PROBETA N°	Lectura Estabilidad	Estabilidad Gráfico (KN)	Factor	ESTABILIDAD (KN)	FLUENCIA (0,01")	Fluencia (mm)
Mezcla 0%	1	298	12,52	1,035	12,962	12,5	3,18
	2	316	13,27	1,043	13,841	13,0	3,30
	3	294	12,36	1,019	12,592	12,0	3,05
	4	320	13,44	1,062	14,269	11,0	2,79
	5	310	13,02	1,027	13,373	12,5	3,18
					13,41	12,2	3,10
Mezcla 0,3%	1	383	16,05	1,032	16,56	14,0	3,56
	2	370	15,51	1,043	16,18	13,5	3,43
	3	367	15,39	1,062	16,34	14,0	3,56
	4	372	15,59	1,081	16,86	14,5	3,68
	5	360	15,10	1,056	15,94	14,5	3,68
					16,38	14,1	3,58
Mezcla 0,6%	1	367	15,39	1,037	15,96	12,5	3,18
	2	367	15,39	1,087	16,73	13,0	3,30
	3	355	14,89	1,056	15,72	13,5	3,43
	4	364	15,26	1,059	16,16	13,0	3,30
	5	378	15,84	1,035	16,40	12,5	3,18
					16,19	12,9	3,28
Mezcla 1%	1	346	14,52	1,056	15,33	11,5	2,92
	2	349	14,64	1,043	15,27	11,0	2,79
	3	348	14,60	1,059	15,46	11,5	2,92
	4	354	14,85	1,062	15,77	12,0	3,05
	5	357	14,97	1,021	15,29	11,0	2,79
					15,42	11,4	2,90

Anexo B9: Valores de VAM, Va y V_{LL} de las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias)

PROBETA N°	ESTABILIDAD (KN)	FLUENCIA (0,01") (0,25 mm)	Fluencia (mm)	DENSIDAD (Kg/m3)	VAM (%)	Va (%)	Huecos llenos de Asfalto (%)
MAC Patrón							
	15,41	11,0	2,79	2333,3	15,66	5,41	65,47
Mezcla con 0% de Zeolita							
1	12,96	12,5	3,18	2327,3	15,88	5,65	64,40
2	13,84	13,0	3,30	2332,2	15,70	5,45	65,27
3	12,59	12,0	3,05	2329,3	15,80	5,57	64,76
4	14,27	11,0	2,79	2327,6	15,86	5,64	64,46
5	13,37	12,5	3,18	2321,3	16,09	5,89	63,37
	13,41	12,2	3,10	2327,6	15,87	5,64	64,45
Mezcla con 0,3% de Zeolita							
1	16,56	14,0	3,56	2348,4	15,11	4,80	68,26
2	16,18	13,5	3,43	2352,8	14,96	4,62	69,11
3	16,34	14,0	3,56	2350,8	15,03	4,70	68,74
4	16,86	14,5	3,68	2348,3	15,12	4,80	68,25
5	15,94	14,5	3,68	2352,7	14,96	4,62	69,11
	16,38	14,1	3,58	2350,6	15,03	4,71	68,69
Mezcla con 0,6% de Zeolita							
1	15,96	12,5	3,18	2339,7	15,43	5,15	66,63
2	16,73	13,0	3,30	2340,5	15,40	5,12	66,78
3	15,72	13,5	3,43	2346,2	15,19	4,88	67,85
4	16,16	13,0	3,30	2343,1	15,30	5,01	67,26
5	16,40	12,5	3,18	2343,5	15,29	4,99	67,34
	16,19	12,9	3,28	2342,6	15,32	5,03	67,17
Mezcla con 1% de Zeolita							
1	15,33	11,5	2,92	2344,2	15,26	4,97	67,47
2	15,27	11,0	2,79	2345,5	15,22	4,91	67,71
3	15,46	11,5	2,92	2347,8	15,14	4,82	68,15
4	15,77	12,0	3,05	2341,2	15,37	5,09	66,91
5	15,29	11,0	2,79	2348,3	15,12	4,80	68,24
	15,42	11,4	2,90	2345,4	15,22	4,92	67,70

Anexo B10: Valores de resistencia a tracción indirecta (ITS) y porcentajes de resistencia a tracción retenida (TSR) de las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias).

ENSAYE ITS seco					ENSAYE ITS sss					
MEZCLA	PROBETA N°	Lectura Carga máx.	Carga Máx. (KN)	Tracción Indirecta (Kpa)	MEZCLA	PROBETA N°	Lectura Carga máx.	Carga Máx. (KN)	Tracción Indirecta (Kpa)	TSR (%)
MAC Patrón	1	282,0	11,86	1233,11	MAC Patrón	4	250,0	10,53	1075,18	87,19
	2	287,5	12,09	1233,81		5	254,0	10,70	1088,58	88,23
	3	288,0	12,11	1232,92		6	262,0	11,03	1116,02	90,52
				1233,28					1093,26	88,65
Mezcla 0%	1	216,5	9,14	899,01	Mezcla 0%	4	168,0	7,128	715,37	79,57
	2	215,0	9,08	925,38		5	173,0	7,336	732,09	79,11
	3	221,0	9,33	947,49		6	176,0	7,460	756,26	79,82
				923,96					734,58	79,50
Mezcla 0,3%	1	239,0	10,07	1030,88	Mezcla 0,3%	4	210,0	8,871	900,39	87,34
	2	232,0	9,78	990,44		5	213,0	8,996	902,07	91,08
	3	243,0	10,24	1026,91		6	212,0	8,954	900,43	87,68
				1016,08					900,96	88,67
Mezcla 0,6%	1	241,0	10,16	1000,37	Mezcla 0,6%	4	217,5	9,183	922,64	92,23
	2	249,0	10,49	1052,30		5	217,5	9,183	941,70	89,49
	3	229,0	9,66	993,08		6	217,0	9,162	933,84	94,03
				1015,25					932,73	91,87
Mezcla 1%	1	254,0	10,70	1099,74	Mezcla 1%	4	216,0	9,120	932,27	84,77
	2	263,0	11,07	1116,84		5	211,0	8,913	901,13	80,69
	3	265,0	11,15	1139,20		6	214,0	9,037	919,66	80,73
				1118,59					917,69	82,04

Anexos C

En esta sección de anexos se presenta el análisis estadístico que se realizó a los valores de las probetas ensayadas, según la propiedad o parámetro evaluado. A cada conjunto de probetas que constituyen una determinada mezcla asfáltica, o grupo de probetas de igual contenido asfáltico, según sea el caso, se le calculó una serie de estadísticos descriptivos y medidas de dispersión.

Además se presentan los resultados de los análisis de varianza (ANOVA) realizados a los grupos de comparación, con el fin de establecer y respaldar las diferencias existentes entre propiedades analizadas como diferencias estadísticamente significativas.

Anexo C1: Estadísticos descriptivos de las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 4,0% de Asfalto

Estadísticos Descriptivos de las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 4,0% de Asfalto

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%			Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior			
Densidad real									
MAC Patrón	3	2306,8642	1,57347	,90844	2302,9555	2310,7730	2305,89	2308,68	
MAC 0,3%	3	2312,9873	1,94233	1,12141	2308,1623	2317,8123	2311,45	2315,17	
Total	6	2309,9258	3,70768	1,51365	2306,0348	2313,8167	2305,89	2315,17	
Vacios en el agregado mineral (%)									
MAC Patrón	3	15,8131	,05742	,03315	15,6705	15,9558	15,75	15,85	
MAC 0,3%	3	15,5897	,07088	,04092	15,4136	15,7658	15,51	15,65	
Total	6	15,7014	,13531	,05524	15,5594	15,8434	15,51	15,85	
Huecos de aire en la mezcla (%)									
MAC Patrón	3	7,7557	,06292	,03633	7,5994	7,9120	7,68	7,79	
MAC 0,3%	3	7,5109	,07767	,04484	7,3179	7,7038	7,42	7,57	
Total	6	7,6333	,14826	,06053	7,4777	7,7889	7,42	7,79	
Huecos llenos de asfalto (%)									
MAC Patrón	3	50,9546	,22024	,12716	50,4075	51,5017	50,82	51,21	
MAC 0,3%	3	51,8224	,27971	,16149	51,1276	52,5173	51,60	52,14	
Total	6	51,3885	,52597	,21473	50,8365	51,9405	50,82	52,14	
Absorción de Agua (%)									
MAC Patrón	3	1,8921	,14245	,08225	1,5382	2,2460	1,73	1,98	
MAC 0,3%	3	1,8427	,04328	,02499	1,7352	1,9502	1,81	1,89	
Total	6	1,8674	,09797	,04000	1,7646	1,9702	1,73	1,98	
Estabilidad (KN)									
MAC Patrón	3	14,7309	,52146	,30106	13,4356	16,0263	14,21	15,26	
MAC 0,3%	3	15,1251	1,12270	,64819	12,3362	17,9141	14,02	16,26	
Total	6	14,9280	,81214	,33155	14,0758	15,7803	14,02	16,26	
Fluencia (0,01")									
MAC Patrón	3	10,0000	,50000	,28868	8,7579	11,2421	9,50	10,50	
MAC 0,3%	3	11,6667	,76376	,44096	9,7694	13,5640	11,00	12,50	
Total	6	10,8333	1,08012	,44096	9,6998	11,9669	9,50	12,50	

Anexo C2: Análisis de varianza entre las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 4,0% de Asfalto

Prueba de homogeneidad de varianzas

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Densidad real compactada (Kg/m3)	,203	1	4	,675
Vacios en el agregado mineral (%)	,203	1	4	,675
Huecos de aire en la mezcla (%)	,203	1	4	,675
Huecos llenos de asfalto (%)	,270	1	4	,631
Absorción de Agua (%)	6,986	1	4	,057
Estabilidad (KN)	1,012	1	4	,371
Fluencia (0,01")	,727	1	4	,442

Análisis de Varianza entre las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 4,0% de Asfalto

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Densidad real compactada (Kg/m3)	Inter-grupos	56,238	1	56,238	18,000	,013
	Intra-grupos	12,497	4	3,124		
	Total	68,735	5			
Vacios en el agregado mineral (%)	Inter-grupos	,075	1	,075	18,000	,013
	Intra-grupos	,017	4	,004		
	Total	,092	5			
Huecos de aire en la mezcla (%)	Inter-grupos	,090	1	,090	18,000	,013
	Intra-grupos	,020	4	,005		
	Total	,110	5			
Huecos llenos de asfalto (%)	Inter-grupos	1,130	1	1,130	17,827	,013
	Intra-grupos	,253	4	,063		
	Total	1,383	5			
Absorción de Agua (%)	Inter-grupos	,004	1	,004	,330	,596
	Intra-grupos	,044	4	,011		
	Total	,048	5			
Estabilidad (KN)	Inter-grupos	,233	1	,233	,304	,611
	Intra-grupos	3,065	4	,766		
	Total	3,298	5			
Fluencia (0,01")	Inter-grupos	4,167	1	4,167	10,000	,034
	Intra-grupos	1,667	4	,417		
	Total	5,833	5			

Anexo C3: Estadísticos descriptivos de las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 4,5% de Asfalto

Estadísticos Descriptivos de las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 4,5% de Asfalto

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Densidad real compactada (Kg/m3)	3	2317,8530	4,17995	2,41330	2307,4694	2328,2366	2313,48	2321,81
MAC Patrón	3	2330,0388	3,49495	2,01781	2321,3568	2338,7207	2326,18	2332,99
Total	6	2323,9459	7,51150	3,06656	2316,0631	2331,8287	2313,48	2332,99
Vacios en el agregado mineral (%)	3	15,8168	,15181	,08765	15,4397	16,1940	15,67	15,98
MAC Patrón	3	15,3743	,12693	,07329	15,0589	15,6896	15,27	15,51
MAC 0,3%	3	15,3743	,12693	,07329	15,0589	15,6896	15,27	15,51
Total	6	15,5955	,27281	,11138	15,3092	15,8818	15,27	15,98
Huecos de aire en la mezcla (%)	3	6,6725	,16830	,09717	6,2544	7,0906	6,51	6,85
MAC Patrón	3	6,1818	,14072	,08125	5,8323	6,5314	6,06	6,34
MAC 0,3%	3	6,1818	,14072	,08125	5,8323	6,5314	6,06	6,34
Total	6	6,4272	,30245	,12347	6,1098	6,7446	6,06	6,85
Huecos llenos de asfalto (%)	3	57,8183	,65830	,38007	56,1830	59,4535	57,13	58,44
MAC Patrón	3	59,7942	,58164	,33581	58,3494	61,2391	59,15	60,29
MAC 0,3%	3	59,7942	,58164	,33581	58,3494	61,2391	59,15	60,29
Total	6	58,8062	1,21656	,49666	57,5295	60,0829	57,13	60,29
Absorción de Agua (%)	3	1,2679	,14713	,08494	,9024	1,6334	1,10	1,36
MAC Patrón	3	1,0233	,00121	,00070	1,0203	1,0263	1,02	1,02
MAC 0,3%	3	1,0233	,00121	,00070	1,0203	1,0263	1,02	1,02
Total	6	1,1456	,16313	,06660	,9744	1,3168	1,02	1,36
Estabilidad (KN)	3	15,0369	,69744	,40267	13,3044	16,7694	14,55	15,84
MAC Patrón	3	16,6185	,58578	,33820	15,1633	18,0737	16,04	17,21
MAC 0,3%	3	16,6185	,58578	,33820	15,1633	18,0737	16,04	17,21
Total	6	15,8277	1,04032	,42471	14,7359	16,9194	14,55	17,21
Fluencia (0,01")	3	10,8333	,76376	,44096	8,9360	12,7306	10,00	11,50
MAC Patrón	3	11,8333	1,04083	,60093	9,2478	14,4189	11,00	13,00
MAC 0,3%	3	11,8333	1,04083	,60093	9,2478	14,4189	11,00	13,00
Total	6	11,3333	,98319	,40139	10,3015	12,3651	10,00	13,00

Anexo C4: Análisis de varianza entre las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 4,5% de Asfalto

Prueba de homogeneidad de varianzas

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Densidad real compactada (Kg/m3)	,051	1	4	,833
Vacios en el agregado mineral (%)	,051	1	4	,833
Huecos de aire en la mezcla (%)	,051	1	4	,833
Huecos llenos de asfalto (%)	,015	1	4	,907
Absorción de Agua (%)	14,997	1	4	,018
Estabilidad (KN)	,332	1	4	,595
Fluencia (0,01")	,500	1	4	,519

Análisis de Varianza entre las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 4,5% de Asfalto

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Densidad real compactada (Kg/m3)	Inter-grupos	222,740	1	222,740	15,006	,018
	Intra-grupos	59,373	4	14,843		
	Total	282,113	5			
Vacios en el agregado mineral (%)	Inter-grupos	,294	1	,294	15,006	,018
	Intra-grupos	,078	4	,020		
	Total	,372	5			
Huecos de aire en la mezcla (%)	Inter-grupos	,361	1	,361	15,006	,018
	Intra-grupos	,096	4	,024		
	Total	,457	5			
Huecos llenos de asfalto (%)	Inter-grupos	5,857	1	5,857	15,180	,018
	Intra-grupos	1,543	4	,386		
	Total	7,400	5			
Absorción de Agua (%)	Inter-grupos	,090	1	,090	8,292	,045
	Intra-grupos	,043	4	,011		
	Total	,133	5			
Estabilidad (KN)	Inter-grupos	3,752	1	3,752	9,046	,040
	Intra-grupos	1,659	4	,415		
	Total	5,411	5			
Fluencia (0,01")	Inter-grupos	1,500	1	1,500	1,800	,251
	Intra-grupos	3,333	4	,833		
	Total	4,833	5			

Anexo C5: Estadísticos descriptivos de las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 5,0% de Asfalto

Estadísticos Descriptivos de las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 5,0% de Asfalto

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Densidad real compactada (Kg/m3)	3	2333,3143	3,03566	1,75264	2325,7734	2340,8553	2331,30	2336,81
MAC 0,3%	3	2358,8429	2,85913	1,65072	2351,7404	2365,9454	2355,56	2360,75
Total	6	2346,0786	14,22913	5,80902	2331,1461	2361,0112	2331,30	2360,75
Vacios en el agregado mineral (%)	3	15,6588	,10973	,06335	15,3863	15,9314	15,53	15,73
MAC 0,3%	3	14,7361	,10335	,05967	14,4793	14,9928	14,67	14,85
Total	6	15,1975	,51433	,20998	14,6577	15,7372	14,67	15,73
Huecos de aire en la mezcla (%)	3	5,4080	,12306	,07105	5,1023	5,7137	5,27	5,49
MAC 0,3%	3	4,3731	,11591	,06692	4,0852	4,6610	4,30	4,51
Total	6	4,8905	,57685	,23550	4,2852	5,4959	4,30	5,49
Huecos llenos de asfalto (%)	3	65,4661	,54605	,31526	64,1096	66,8226	65,10	66,09
MAC 0,3%	3	70,3266	,57621	,33268	68,8952	71,7580	69,66	70,71
Total	6	67,8964	2,70915	1,10601	65,0533	70,7395	65,10	70,71
Absorción de Agua (%)	3	,5164	,05218	,03013	,3868	,6460	,47	,57
MAC 0,3%	3	,3984	,07267	,04196	,2179	,5790	,33	,47
Total	6	,4574	,08588	,03506	,3673	,5475	,33	,57
Estabilidad (KN)	3	15,4113	,60102	,34700	13,9183	16,9043	14,81	16,01
MAC 0,3%	3	17,8707	,20217	,11673	17,3684	18,3729	17,67	18,07
Total	6	16,6410	1,40549	,57379	15,1660	18,1159	14,81	18,07
Fluencia (0,01")	3	11,0000	1,00000	,57735	8,5159	13,4841	10,00	12,00
MAC 0,3%	3	13,0000	,50000	,28868	11,7579	14,2421	12,50	13,50
Total	6	12,0000	1,30384	,53229	10,6317	13,3683	10,00	13,50

Anexo C6: Análisis de varianza entre las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 5,0% de Asfalto

Prueba de homogeneidad de varianzas

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Densidad real compactada (Kg/m3)	,027	1	4	,878
Vacios en el agregado mineral (%)	,027	1	4	,878
Huecos de aire en la mezcla (%)	,027	1	4	,878
Huecos llenos de asfalto (%)	,021	1	4	,891
Absorción de Agua (%)	,255	1	4	,640
Estabilidad (KN)	1,617	1	4	,272
Fluencia (0,01")	,800	1	4	,422

Análisis de Varianza entre las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 5,0% de Asfalto

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Densidad real compactada (Kg/m3)	Inter-grupos	977,562	1	977,562	112,429	,000
	Intra-grupos	34,780	4	8,695		
	Total	1012,341	5			
Vacios en el agregado mineral (%)	Inter-grupos	1,277	1	1,277	112,429	,000
	Intra-grupos	,045	4	,011		
	Total	1,323	5			
Huecos de aire en la mezcla (%)	Inter-grupos	1,607	1	1,607	112,429	,000
	Intra-grupos	,057	4	,014		
	Total	1,664	5			
Huecos llenos de asfalto (%)	Inter-grupos	35,437	1	35,437	112,465	,000
	Intra-grupos	1,260	4	,315		
	Total	36,698	5			
Absorción de Agua (%)	Inter-grupos	,021	1	,021	5,215	,084
	Intra-grupos	,016	4	,004		
	Total	,037	5			
Estabilidad (KN)	Inter-grupos	9,073	1	9,073	45,127	,003
	Intra-grupos	,804	4	,201		
	Total	9,877	5			
Fluencia (0,01")	Inter-grupos	6,000	1	6,000	9,600	,036
	Intra-grupos	2,500	4	,625		
	Total	8,500	5			

Anexo C7: Estadísticos descriptivos de las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 5,5% de Asfalto

Estadísticos Descriptivos de las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 5,5% de Asfalto

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Densidad real compactada (Kg/m3)	3	2354,5529	,77758	,44893	2352,6213	2356,4846	2353,92	2355,42
MAC 0,3%	3	2360,2091	1,91895	1,10791	2355,4421	2364,9760	2358,98	2362,42
Total	6	2357,3810	3,36337	1,37309	2353,8514	2360,9106	2353,92	2362,42
Vacios en el agregado mineral (%)	3	15,2945	,02797	,01615	15,2250	15,3640	15,26	15,32
MAC Patrón	3	15,0910	,06903	,03986	14,9195	15,2625	15,01	15,14
MAC 0,3%	6	15,1928	,12100	,04940	15,0658	15,3197	15,01	15,32
Total	3	3,9054	,03173	,01832	3,8265	3,9842	3,87	3,93
Huecos de aire en la mezcla (%)	3	3,6745	,07832	,04522	3,4800	3,8691	3,58	3,72
MAC Patrón	3	3,7899	,13727	,05604	3,6459	3,9340	3,58	3,93
MAC 0,3%	6	3,7899	,13727	,05604	3,6459	3,9340	3,58	3,93
Total	3	74,4658	,16091	,09290	74,0661	74,8655	74,33	74,65
Huecos llenos de asfalto (%)	3	75,6522	,40864	,23593	74,6371	76,6673	75,39	76,12
MAC Patrón	3	75,6522	,40864	,23593	74,6371	76,6673	75,39	76,12
MAC 0,3%	6	75,0590	,70669	,28851	74,3174	75,8006	74,33	76,12
Total	3	,2999	,09442	,05451	,0653	,5344	,25	,41
Absorción de Agua (%)	3	,5553	,02085	,01204	,5035	,6071	,53	,58
MAC Patrón	3	,5553	,02085	,01204	,5035	,6071	,53	,58
MAC 0,3%	6	,4276	,15270	,06234	,2674	,5879	,25	,58
Total	3	15,0760	,47270	,27291	13,9018	16,2502	14,74	15,62
Estabilidad (KN)	3	16,9015	,55766	,32197	15,5161	18,2868	16,36	17,47
MAC Patrón	3	16,9015	,55766	,32197	15,5161	18,2868	16,36	17,47
MAC 0,3%	6	15,9887	1,10157	,44971	14,8327	17,1448	14,74	17,47
Total	3	12,0000	1,00000	,57735	9,5159	14,4841	11,00	13,00
Fluencia (0,01")	3	12,6667	,76376	,44096	10,7694	14,5640	12,00	13,50
MAC Patrón	3	12,6667	,76376	,44096	10,7694	14,5640	12,00	13,50
MAC 0,3%	6	12,3333	,87560	,35746	11,4145	13,2522	11,00	13,50
Total	6	12,3333	,87560	,35746	11,4145	13,2522	11,00	13,50

Anexo C8: Análisis de varianza entre las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 5,5% de Asfalto

Prueba de homogeneidad de varianzas

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Densidad real compactada (Kg/m3)	4,575	1	4	,099
Vacios en el agregado mineral (%)	4,575	1	4	,099
Huecos de aire en la mezcla (%)	4,575	1	4	,099
Huecos llenos de asfalto (%)	4,799	1	4	,094
Absorción de Agua (%)	9,133	1	4	,039
Estabilidad (KN)	,009	1	4	,930
Fluencia (0,01")	,082	1	4	,789

Análisis de Varianza entre las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 5,5% de Asfalto

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Densidad real compactada (Kg/m3)	Inter-grupos	47,987	1	47,987	22,387	,009
	Intra-grupos	8,574	4	2,143		
	Total	56,561	5			
Vacios en el agregado mineral (%)	Inter-grupos	,062	1	,062	22,387	,009
	Intra-grupos	,011	4	,003		
	Total	,073	5			
Huecos de aire en la mezcla (%)	Inter-grupos	,080	1	,080	22,387	,009
	Intra-grupos	,014	4	,004		
	Total	,094	5			
Huecos llenos de asfalto (%)	Inter-grupos	2,111	1	2,111	21,893	,009
	Intra-grupos	,386	4	,096		
	Total	2,497	5			
Absorción de Agua (%)	Inter-grupos	,098	1	,098	20,937	,010
	Intra-grupos	,019	4	,005		
	Total	,117	5			
Estabilidad (KN)	Inter-grupos	4,998	1	4,998	18,706	,012
	Intra-grupos	1,069	4	,267		
	Total	6,067	5			
Fluencia (0,01")	Inter-grupos	,667	1	,667	,842	,411
	Intra-grupos	3,167	4	,792		
	Total	3,833	5			

Anexo C9: Estadísticos descriptivos de las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 6,0% de Asfalto

Estadísticos Descriptivos de las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 6,0% de Asfalto

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Densidad real compactada (Kg/m3)								
MAC Patrón	3	2338,4215	1,49655	,86403	2334,7038	2342,1391	2336,84	2339,82
MAC 0,3%	3	2349,2266	8,07569	4,66250	2329,1655	2369,2877	2344,36	2358,55
Total	6	2343,8240	7,87450	3,21475	2335,5603	2352,0878	2336,84	2358,55
Vacios en el agregado mineral (%)								
MAC Patrón	3	16,2716	,03358	,03094	16,1385	16,4048	16,22	16,33
MAC 0,3%	3	15,8848	,28915	,16694	15,1665	16,6031	15,55	16,06
Total	6	16,0782	,28195	,11511	15,7823	16,3741	15,55	16,33
Huecos de aire en la mezcla (%)								
MAC Patrón	3	3,9325	,06148	,03550	3,7798	4,0852	3,87	4,00
MAC 0,3%	3	3,4886	,33177	,19155	2,6644	4,3127	3,11	3,69
Total	6	3,7105	,32350	,13207	3,3710	4,0500	3,11	4,00
Huecos llenos de asfalto (%)								
MAC Patrón	3	75,8329	,29809	,17210	75,0924	76,5734	75,52	76,11
MAC 0,3%	3	78,0588	1,70708	,98558	73,8182	82,2994	77,03	80,03
Total	6	76,9459	1,63940	,66928	75,2254	78,6663	75,52	80,03
Absorción de Agua (%)								
MAC Patrón	3	,2904	,06206	,03583	,1363	,4446	,22	,34
MAC 0,3%	3	,3550	,19618	,11327	-,1324	,8423	,14	,53
Total	6	,3227	,13485	,05505	,1812	,4642	,14	,53
Estabilidad (KN)								
MAC Patrón	3	14,3137	,83162	,48014	12,2478	16,3796	13,48	15,15
MAC 0,3%	3	15,1852	,48833	,28194	13,9721	16,3983	14,72	15,69
Total	6	14,7495	,77452	,31620	13,9367	15,5623	13,48	15,69
Fluencia (0,01")								
MAC Patrón	3	12,1667	,76376	,44096	10,2694	14,0640	11,50	13,00
MAC 0,3%	3	12,5000	,50000	,28868	11,2579	13,7421	12,00	13,00
Total	6	12,3333	,60553	,24721	11,6979	12,9688	11,50	13,00

Anexo C10: Análisis de varianza entre las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 6,0% de Asfalto

Prueba de homogeneidad de varianzas

	Estadístico de Levene	ql1	ql2	Sig.
Densidad real compactada (Kg/m3)	10,168	1	4	,033
Vacios en el agregado mineral (%)	10,168	1	4	,033
Huecos de aire en la mezcla (%)	10,168	1	4	,033
Huecos llenos de asfalto (%)	10,499	1	4	,032
Absorción de Agua (%)	2,911	1	4	,163
Estabilidad (KN)	,477	1	4	,528
Fluencia (0,01")	,727	1	4	,442

Análisis de Varianza entre las mezclas MAC Patrón y MAC con 0,3% de zeolita - Para un 6,0% de Asfalto

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Densidad real compactada (Kg/m3)	Inter-grupos	175,126	1	175,126	5,192	,085
	Intra-grupos	134,913	4	33,728		
	Total	310,039	5			
Vacios en el agregado mineral (%)	Inter-grupos	,225	1	,225	5,192	,085
	Intra-grupos	,173	4	,043		
	Total	,397	5			
Huecos de aire en la mezcla (%)	Inter-grupos	,296	1	,296	5,192	,085
	Intra-grupos	,228	4	,057		
	Total	,523	5			
Huecos llenos de asfalto (%)	Inter-grupos	7,432	1	7,432	4,950	,090
	Intra-grupos	6,006	4	1,501		
	Total	13,438	5			
Absorción de Agua (%)	Inter-grupos	,006	1	,006	,295	,616
	Intra-grupos	,085	4	,021		
	Total	,091	5			
Estabilidad (KN)	Inter-grupos	1,139	1	1,139	2,450	,193
	Intra-grupos	1,860	4	,465		
	Total	2,999	5			
Fluencia (0,01")	Inter-grupos	,167	1	,167	,400	,561
	Intra-grupos	1,667	4	,417		
	Total	1,833	5			

Anexo C11: Estadísticos descriptivos de propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia en mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias).

Parámetros Marshall	Mezclas	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo	Varianza entre componentes
						Límite inferior	Límite superior			
Densidad real compactada (Kg/m ³)	MAC Patrón	3	2333,3143	3,03566	1,75264	2325,7734	2340,8553	2331,30	2336,81	88,13323
	Mezcla con 0% de Zeolita	5	2327,5673	4,00343	1,79039	2322,5964	2332,5382	2321,32	2332,25	
	Mezcla con 0,3% de Zeolita	5	2350,6128	2,20053	,98411	2347,8804	2353,3451	2348,33	2352,76	
	Mezcla con 0,6% de Zeolita	5	2342,6293	2,60100	1,16320	2339,3998	2345,8589	2339,73	2346,25	
	Mezcla con 1% de Zeolita	5	2345,4016	2,85666	1,27754	2341,8546	2348,9486	2341,24	2348,26	
	Total	23	2340,4782	9,06270	1,88970	2336,5592	2344,3972	2321,32	2352,76	
Vacíos en el agregado mineral (%)	Modelo		2,99641	2,99641	,62479	2339,1655	2341,7908			
	MAC Patrón	3	15,6588	,10973	,06335	15,3863	15,9314	15,53	15,73	
	Mezcla con 0% de Zeolita	5	15,8666	,14471	,06472	15,6869	16,0463	15,70	16,09	
	Mezcla con 0,3% de Zeolita	5	15,0336	,07954	,03557	14,9348	15,1323	14,96	15,12	
	Mezcla con 0,6% de Zeolita	5	15,3221	,09402	,04205	15,2054	15,4389	15,19	15,43	
	Mezcla con 1% de Zeolita	5	15,2219	,10326	,04618	15,0937	15,3501	15,12	15,37	
Huecos de aire en la mezcla (%)	Total	23	15,3999	,32758	,06831	15,2582	15,5415	14,96	16,09	
	Modelo		,10831	,10831	,02258	15,3524	15,4473			,11515
	MAC Patrón	3	5,4080	,12306	,07105	5,1023	5,7137	5,27	5,49	
	Mezcla con 0% de Zeolita	5	5,6408	,16230	,07258	5,4393	5,8423	5,45	5,89	
	Mezcla con 0,3% de Zeolita	5	4,7066	,08921	,03990	4,5958	4,8173	4,62	4,80	
	Mezcla con 0,6% de Zeolita	5	5,0302	,10544	,04716	4,8993	5,1611	4,88	5,15	
	Mezcla con 1% de Zeolita	5	4,9178	,11581	,05179	4,7740	5,0616	4,80	5,09	
	Total	23	5,1174	,36742	,07661	4,9586	5,2763	4,62	5,89	
	Modelo		,12147	,12147	,02533	5,0642	5,1707			,14486
	Efectos fijos									
	Efectos aleatorios									

(Continúa en página siguiente)

Parámetros Marshall	Mezclas	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo	Varianza entre componentes
						Límite inferior	Límite superior			
Huecos llenos de asfalto (%)	MAC Patrón	3	65,4661	,54605	,31526	64,1096	66,8226	65,10	66,09	
	Mezcla con 0% de Zeolita	5	64,4535	,69541	,31100	63,5900	65,3169	63,37	65,27	
	Mezcla con 0,3% de Zeolita	5	68,6948	,42760	,19123	68,1638	69,2257	68,25	69,11	
	Mezcla con 0,6% de Zeolita	5	67,1727	,48738	,21796	66,5675	67,7779	66,63	67,85	
	Mezcla con 1% de Zeolita	5	67,6954	,54024	,24160	67,0246	68,3662	66,91	68,24	
	Total Modelo	23	66,8035	1,66382	,34693	66,0840	67,5230	63,37	69,11	
Estabilidad (KN)	Efectos fijos			,54669	,11399	66,5640	67,0430			2,97508
	Efectos aleatorios			,79121	64,6067	69,0002				
	MAC Patrón	3	15,4113	,60102	,34700	13,9183	16,9043	14,81	16,01	
	Mezcla con 0% de Zeolita	5	13,4075	,66999	,29963	12,5756	14,2394	12,59	14,27	
	Mezcla con 0,3% de Zeolita	5	16,3766	,35222	,15752	15,9393	16,8140	15,94	16,86	
	Mezcla con 0,6% de Zeolita	5	16,1931	,38852	,17375	15,7106	16,6755	15,72	16,73	
Fluencia (0,01")	Mezcla con 1% de Zeolita	5	15,4223	,20711	,09262	15,1652	15,6795	15,27	15,77	
	Total Modelo	23	15,3579	1,19689	,24957	14,8403	15,8755	12,59	16,86	
	Efectos fijos			,45884	,09567	15,1569	15,5589			1,47224
	Efectos aleatorios			,55902	13,8058	16,9100				
	MAC Patrón	3	11,0000	1,00000	,57735	8,5159	13,4841	10,00	12,00	
	Mezcla con 0% de Zeolita	5	12,2000	,75829	,39912	11,2585	13,1415	11,00	13,00	
Agua absorbida (%)	Mezcla con 0,3% de Zeolita	5	14,1000	,41833	,18708	13,5806	14,6194	13,50	14,50	
	Mezcla con 0,6% de Zeolita	5	12,9000	,41833	,18708	12,3806	13,4194	12,50	13,50	
	Mezcla con 1% de Zeolita	5	11,4000	,41833	,18708	10,8806	11,9194	11,00	12,00	
	Total Modelo	23	12,4348	1,22757	,25597	11,9039	12,9656	10,00	14,50	
	Efectos fijos			,59628	,12433	12,1736	12,6960			1,38712
	Efectos aleatorios			,54888	10,9108	13,9587				
Agua absorbida (%)	MAC Patrón	3	,5164	,05218	,03013	,3868	,6460	,47	,57	
	Mezcla con 0% de Zeolita	5	,9390	,25134	,11240	,6270	1,2511	,67	1,28	
	Mezcla con 0,3% de Zeolita	5	,4537	,16253	,07269	,2519	,6555	,27	,64	
	Mezcla con 0,6% de Zeolita	5	,6269	,20314	,09085	,3746	,8791	,45	,96	
	Mezcla con 1% de Zeolita	5	,5044	,20028	,08957	,2557	,7531	,33	,84	
	Total Modelo	23	,6161	,25543	,05326	,5056	,7265	,27	1,28	
	Efectos fijos			,19569	,04080	,5303	,7018			,03247
	Efectos aleatorios			,09140	,3623	,8698				

Anexo C12: Análisis de varianza entre las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias)

Prueba de homogeneidad de varianzas

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Densidad real compactada (Kg/m3)	,159	4	18	,956
Vacios en el agregado mineral (%)	,159	4	18	,956
Huecos de aire en la mezcla (%)	,159	4	18	,956
Huecos llenos de asfalto (%)	,081	4	18	,987
Estabilidad (KN)	1,594	4	18	,219
Fluencia (0,01")	,987	4	18	,440
Agua absorbida (%)	1,439	4	18	,262

ANOVA de un factor

Parámetro Marshall		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Densidad real compactada (Kg/m3)	Inter-grupos	1645,303	4	411,326	45,812	,000
	Intra-grupos	161,612	18	8,978		
	Total	1806,916	22			
Vacios en el agregado mineral (%)	Inter-grupos	2,150	4	,537	45,812	,000
	Intra-grupos	,211	18	,012		
	Total	2,361	22			
Huecos de aire en la mezcla (%)	Inter-grupos	2,704	4	,676	45,817	,000
	Intra-grupos	,266	18	,015		
	Total	2,970	22			
Huecos llenos de asfalto (%)	Inter-grupos	55,523	4	13,881	46,444	,000
	Intra-grupos	5,380	18	,299		
	Total	60,903	22			
Estabilidad (KN)	Inter-grupos	27,727	4	6,932	32,924	,000
	Intra-grupos	3,790	18	,211		
	Total	31,516	22			
Fluencia (0,01")	Inter-grupos	26,752	4	6,688	18,810	,000
	Intra-grupos	6,400	18	,356		
	Total	33,152	22			
Agua absorbida (%)	Inter-grupos	,746	4	,187	4,870	,008
	Intra-grupos	,689	18	,038		
	Total	1,435	22			

Anexo C13: Comparaciones múltiples y subconjuntos homogéneos de las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias)

Densidad real compactada (Kg/m³)

HSD de Tukey

Mezcla / Cont. Zeolita	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Mezcla con 0% de Zeolita	5	2327,5673		
MAC Patrón	3	2333,3143		
Mezcla con 0,6% de Zeolita	5		2342,6293	
Mezcla con 1% de Zeolita	5		2345,4016	
Mezcla con 0,3% de Zeolita	5			2350,6128
Sig.		,070	,651	,116

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,412.

b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Vacios en el agregado mineral (%)

HSD de Tukey

Mezcla / Cont. Zeolita	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Mezcla con 0,3% de Zeolita	5	15,0336		
Mezcla con 1% de Zeolita	5		15,2219	
Mezcla con 0,6% de Zeolita	5		15,3221	
MAC Patrón	3			15,6588
Mezcla con 0% de Zeolita	5			15,8666
Sig.		,116	,651	,070

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,412.

b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

(Continúa en página siguiente)

Huecos de aire en la mezcla (%)

HSD de Tukey

Mezcla / Cont. Zeolita	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Mezcla con 0,3% de Zeolita	5	4,7066		
Mezcla con 1% de Zeolita	5		4,9178	
Mezcla con 0,6% de Zeolita	5		5,0302	
MAC Patrón	3			5,4080
Mezcla con 0% de Zeolita	5			5,6408
Sig.		,116	,651	,071

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,412.

b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Huecos llenos de asfalto (%)

HSD de Tukey

Mezcla / Cont. Zeolita	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Mezcla con 0% de Zeolita	5	64,4535		
MAC Patrón	3	65,4661		
Mezcla con 0,6% de Zeolita	5		67,1727	
Mezcla con 1% de Zeolita	5		67,6954	
Mezcla con 0,3% de Zeolita	5			68,6948
Sig.		,085	,623	,091

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,412.

b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

(Continúa en página siguiente)

Estabilidad (KN)

HSD de Tukey

Mezcla / Cont. Zeolita	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Mezcla con 0% de Zeolita	5	13,4075		
MAC Patrón	3		15,4113	
Mezcla con 1% de Zeolita	5		15,4223	
Mezcla con 0,6% de Zeolita	5			16,1931
Mezcla con 0,3% de Zeolita	5			16,3766
Sig.		1,000	,127	,974

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,412.

b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Fluencia (0,01")

HSD de Tukey

Mezcla / Cont. Zeolita	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
MAC Patrón	3	11,0000		
Mezcla con 1% de Zeolita	5	11,4000		
Mezcla con 0% de Zeolita	5		12,2000	
Mezcla con 0,6% de Zeolita	5		12,9000	
Mezcla con 0,3% de Zeolita	5			14,1000
Sig.		,054	,434	,054

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,412.

b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Anexo C14: Estadísticos descriptivos de los valores de resistencia a tracción indirecta en estado seco y análisis de varianza, entre las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias)

		Descriptivos							
Tracción Indirecta (Kpa)		N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
						Límite inferior	Límite superior		
MAC Patrón		3	1233,2787	,47045	,27161	1232,1101	1234,4474	1232,92	1233,81
Mezcla con 0% de Zeolita		3	923,9583	24,27168	14,01326	863,6641	984,2525	899,01	947,49
Mezcla con 0,3% de Zeolita		3	1016,0785	22,28890	12,86850	960,7098	1071,4472	990,44	1030,88
Mezcla de 0,6% Zeolita		3	1015,2513	32,28912	18,64213	935,0407	1095,4620	993,08	1052,30
Mezcla con 1% de Zeolita		3	1118,5924	19,78542	11,42312	1069,4427	1167,7421	1099,74	1139,20
Total		15	1061,4318	111,06691	28,67735	999,9250	1122,9387	899,01	1233,81

Prueba de homogeneidad de varianzas

Tracción Indirecta (Kpa)		gl1	gl2	Sig.
Estadístico de Levene		4	10	,107

ANOVA de un factor

Tracción Indirecta (Kpa)		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos		167661,652	4	41915,413	83,160	,000
Intra-grupos		5040,362	10	504,036		
Total		172702,014	14			

Anexo C15: Comparaciones múltiples y subconjuntos homogéneos de los valores de resistencia a tracción indirecta en estado seco, entre las mezclas fabricadas a 135° C (Mezclas tibias)

Subconjuntos homogéneos

Mezcla / Cont. de Zeolita	N	Tracción Indirecta (Kpa)			
		1	2	3	4
Tukey B ^a					
Mezcla con 0% de	3	923,9583			
Mezcla de 0,6%	3		1015,2513		
Mezcla con 0,3% de	3		1016,0785		
Zeolita					
Mezcla con 1% de	3			1118,5924	
MAC Patrón	3				1233,2787

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3.000.

Anexo C16: Estadísticos descriptivos de los valores de resistencia a tracción indirecta en estado saturado y análisis de varianza, entre las mezclas fabricadas a 135 °C (Mezclas tibias)

Tracción Indirecta (Kpa)		Descriptivos							
		N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%			
						Límite inferior	Límite superior	Mínimo	Máximo
MAC Patrón	3	1093,2600	20,81898	12,01984	1041,5428	1144,9772	1075,18	1116,02	
Mezcla con 0% de Zeolita	3	734,5764	20,55685	11,86851	683,5104	785,6425	715,37	756,26	
Mezcla con 0,3% de Zeolita	3	900,9594	,95777	,55297	898,5802	903,3386	900,39	902,07	
Mezcla de 0,6% de Zeolita	3	932,7269	9,58095	5,53157	908,9265	956,5273	922,64	941,70	
Mezcla con 1% de Zeolita	3	917,6851	15,65978	9,04118	878,7840	956,5861	901,13	932,27	
Total	15	915,8416	118,59926	30,62220	850,1635	981,5196	715,37	1116,02	

Prueba de homogeneidad de varianzas

Tracción Indirecta (Kpa)	
Estadístico de Levene	
	gl1
1,897	4
	gl2
	10
	Sig.
	,188

ANOVA de un factor

Tracción Indirecta (Kpa)		ANOVA de un factor		
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F
Inter-grupos	194533,083	4	48633,271	203,665
Intra-grupos	2387,910	10	238,791	
Total	196920,993	14		
				Sig.
				,000

Anexo C17: Comparaciones múltiples y subconjuntos homogéneos de los valores de resistencia a tracción indirecta en estado saturado, entre las mezclas fabricadas a 135° C (Mezclas tibias)

Subconjuntos homogéneos

Mezcla / Cont. de Zeolita HSD de Tukey ^a	N	Tracción Indirecta (Kpa)		
		1	2	3
Mezcla con 0% de Zeolita	3	734,5764	900,9594	
Mezcla con 0,3% de Zeolita	3		917,6851	
Mezcla con 1% de Zeolita	3		932,7269	
Mezcla de 0,6% de Zeolita	3			1093,2600
MAC Patrón	3	1,000	,162	1,000
Sig.				

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

Apéndices

Apéndice 1: Numeral 8.302.38 del Manual de Carreteras, volumen 8. *“Método para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas”* (en página siguiente).

8.302.38 ASFALTOS: METODO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD REAL DE MEZCLAS ASFALTICAS COMPACTADAS

1.- **Alcances y Campo de Aplicación.** Este método establece procedimientos para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas.

2.- **Terminología.**

2.1 **Densidad (ρ).** De acuerdo con NCh 22, es el cociente entre la masa (m) de una substancia y su volumen (v) a una temperatura especificada. Se expresa en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3).

2.2 **Densidad Real (G).** Densidad en que se considera el volumen macizo de la probeta, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles.

2.3 **Secado hasta Masa Constante.** Límite de secado a $50 \pm 5^\circ \text{C}$, en que dos pesadas sucesivas difieren en un porcentaje igual o inferior al 0,1% de la menor masa determinada. La muestra debe dejarse en horno a $50 \pm 5^\circ \text{C}$ durante 12 h y luego pesarse cada 2 h.

3.- **Resumen del Procedimiento.** Se determina la masa de la probeta por pesada al aire ambiente en condiciones seca y saturada superficialmente seca. Se determina el volumen por diferencia entre pesadas al aire ambiente y sumergida en agua.

Se calcula la densidad real de la probeta de acuerdo a los valores obtenidos.

4.- **Aparatos.**

4.1 **Balanza.** De 2.000 g de capacidad mínima, sensibilidad 0,1 g y una precisión de 0,2 g. (Los términos capacidad y precisión de una balanza están definidos en NCh 1075). Debe estar equipada con un aparato de suspensión adecuado que permita pesar la probeta mientras está suspendida del centro de la balanza.

4.2 **Baño de Agua.** Que permita sumergir la muestra mientras está suspendida bajo la balanza, equipado con una válvula de desborde que mantenga constante el nivel de agua.

5.- **Muestras de Ensaye.**

5.1 Las muestras de ensaye pueden ser mezclas asfálticas moldeadas en el laboratorio o cortadas directamente del pavimento.

5.2 Para el tamaño de la probeta se recomienda lo siguiente:

- a) Que el diámetro de las probetas cilíndricas o la longitud de las probetas aserradas sea a lo menos cuatro veces el tamaño máximo del agregado.
- b) Que el espesor o largo de la probeta sea a lo menos una y media veces el tamaño máximo del agregado.

5.3 Tome las muestras de pavimentos con brocas o sierras diamantadas o cualquier otro medio adecuado.

5.4 Separe las distintas capas mediante aserrado u otro medio adecuado.

Método A: Probetas Cubiertas con Parafina.**6.- Procedimiento de Ensaye.**

6.1 Masa de la Probeta sin Parafina. Pese la probeta en aire después de secarla hasta masa constante. Designe esta masa como A.

6.2 Masa de la Probeta en Aire con Parafina. Cubra la probeta de ensaye, en toda su superficie, con parafina derretida con un espesor suficiente para sellar todos los huecos superficiales. Deje que el recubrimiento se enfríe al aire a temperatura ambiente durante 30 min y luego pese la probeta. Designe esta masa como D.

Nota 1: La aplicación de la parafina se puede lograr mejor enfriando la probeta en un refrigerador hasta una temperatura de aproximadamente 4,5°C por 30 min y luego sumergiéndola en parafina tibia (5,5° C sobre el punto de fusión). Puede ser necesario repasar la superficie con una brocha con parafina caliente para llenar los vacíos más pequeños. Si se desea usar la probeta en otros ensayos que requieran el desprendimiento del cubrimiento de parafina, puede cubrirse la muestra con talco en polvo antes de colocarle la parafina.

6.3 Masa de la Probeta con Parafina en Agua. Pese la probeta con parafina en un baño de agua a 25 ± 1°C. Designe esta masa como E.

6.4 Densidad de la Parafina. Determine la densidad de la parafina a 25° C y designela como ρ_p . Al adoptar un valor típico de 0,91 g/cm³ el error es prácticamente despreciable.

7.- Cálculos. Calcule la densidad de la probeta con la fórmula:

$$G = \frac{A}{\frac{(D-E)}{\rho_w} - \frac{(D-A)}{\rho_p}} \times 1.000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

donde:

- A : Masa de la probeta seca en aire (g)
- D : Masa de la probeta seca más parafina en aire (g)
- E : Masa de la probeta seca más parafina en agua (g)
- ρ_p : Densidad de la parafina (25°C) ± 1 g/cm³
- ρ_w : Densidad del agua (1,0 g/cm³)

Método B: Probetas con Superficie Saturada Seca.**8.- Procedimiento de Ensaye.**

8.1 Seque la probeta hasta masa constante. Enfríela hasta temperatura ambiente (25 ±1°C) y registre la masa seca como A.

8.2 Sumerja en un baño de agua a 25 ± 1° C por 3 a 5 min, y registre esta masa como C.

8.3 Saque la probeta del agua y séquela con una toalla húmeda. Designe esta masa como B.

8.4 Determine el porcentaje de agua absorbida con la siguiente expresión:

$$A_{ab} = \frac{B - A}{B - C} \times 100$$

Si A_{ab} es mayor que 2, emplee el método A.

9.- **Cálculos.** Calcule la densidad de acuerdo a la fórmula:

$$G = \frac{A}{\frac{B-C}{\rho_w}} \times 1.000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

donde:

- A : Masa de la probeta en aire (g).
- B : Masa de la probeta en aire con superficie seca (g).
- C : Masa de la probeta en agua (g)

Método C : Geométrico (sólo para mezclas de graduación abierta; porcentaje de huecos superior a 15)

10.- **Procedimiento de Ensaye.**

10.1 Determine la densidad de una muestra de formas regulares en base a su masa (kg) y su volumen medio en forma geométrica (m³).

10.2 Determine las dimensiones de la probeta basado en el promedio de cuatro medidas, como mínimo, por dimensión.

Apéndice 2: Numeral 8.302.47 del Manual de Carreteras, volumen 8. “Método de diseño Marshall” (en página siguiente).

8.302.47 ASFALTOS: METODO DE DISEÑO MARSHALL

1.- Alcances y Campo de Aplicación. Este procedimiento es aplicable a mezclas en caliente con cementos asfálticos que contengan agregados con tamaño máximo absoluto igual o inferior a 25 mm. Se puede usar tanto para el diseño en laboratorio como en el control de terreno, y describe una metodología para determinar el óptimo de asfalto en las mezclas.

2.- Referencias.

- Método 8.302.37 Asfaltos: método para determinar la densidad máxima de mezclas bituminosas sin compactar.
- Método 8.302.38 Asfaltos: método para determinar la densidad real de mezclas bituminosas compactadas.
- Método 8.302.2 Asfaltos: método para determinar la densidad del asfalto.
- Método 8.302.40 Asfaltos: método para determinar la resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall
- Método 8.202.20 Agregados pétreos: método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los pétreos gruesos.
- Método 8.202.21 Agregados pétreos: método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de los pétreos finos.
- Método 8.402.1 Hormigón: método para determinar la densidad del cemento hidráulico.

3.- Determinaciones Previas.

3.1 Determine la densidad real seca de cada agregado que participa en la mezcla y la del filler, si lo hubiere, de acuerdo a los métodos 8.202.20, 8.202.21 o 8.402.1, según corresponda.

3.2 Determine la densidad del cemento asfáltico a 25 ° C según Método 8.302.2.

3.3 Determine la densidad máxima de la mezcla suelta según Método 8.302.37, para un contenido de asfalto próximo al óptimo previsto.

3.4 Prepare las probetas según Método 8.302.40.

3.5 Determine las densidades de las probetas compactadas, según Método 8.302.38.

3.6 Mida la Estabilidad y la Fluencia de las mezclas usando el equipo Marshall, según Método 8.302.40.

Nota 1: Dado que la densidad real seca del filler mineral es difícil de determinar en forma precisa, se recomienda utilizar el método de Le Chatelier (Método 8.402.1).

4.- Cálculos.

4.1 Cálculo de la Densidad Real Seca Ponderada de la Mezcla de Agregados. Cuando la mezcla está compuesta por dos o más agregados, todos con diferentes densidades reales, calcule la densidad real seca de la mezcla de agregados de acuerdo a la expresión:

$$\rho_{RS} = P_1 \cdot \rho_{RS1} + P_2 \cdot \rho_{RS2} + \dots + P_n \cdot \rho_{RSn}$$

donde:

- ρ_{RS} : Densidad real seca de la mezcla de agregados.
 P_1, P_2, \dots, P_n : Porcentajes en peso de los agregados 1, 2, ... n, expresados en forma decimal.
 $\rho_{RS1}, \rho_{RS2}, \dots, \rho_{RSn}$: Densidades reales secas de los agregados 1, 2,... n.

4.2 Cálculo de la Densidad Efectiva del Agregado. Calcule la densidad efectiva del agregado mediante la expresión:

$$\rho_E = \frac{100}{\frac{100 + P_b}{D_{mm}} - \frac{P_b}{\rho_b}}$$

donde:

- ρ_E : Densidad efectiva del agregado (kg/m^3).
- P_b : Porcentaje de asfalto referido al agregado (%).
- D_{mm} : Densidad máxima de la mezcla suelta (kg/m^3).
- ρ_b : Densidad del asfalto (kg/m^3).

Cálculo del Porcentaje de Asfalto Absorbido. El asfalto absorbido se expresa como un porcentaje referido al agregado y se calcula con la fórmula siguiente:

$$P_{ba} = \left(\frac{1}{\rho_{RS}} - \frac{1}{\rho_E} \right) \times \rho_b \times 100$$

donde:

- P_{ba} : Porcentaje de asfalto absorbido, referido al agregado (%).
- ρ_{RS} : Densidad real seca del agregado (kg/m^3).
- ρ_E : Densidad efectiva del agregado (kg/m^3).
- ρ_b : Densidad del asfalto (kg/m^3).

4.4 Cálculo de la Densidad Máxima de la Mezcla para Distintos Contenidos de Asfalto. Al calcular el porcentaje de huecos de aire en la mezcla, es necesario conocer D_{mm} para cada porcentaje de asfalto considerado. Si bien esto se puede hacer a través del Método 8.302.37 para cada contenido de asfalto, la precisión del ensaye es mejor cuando se aproxima al contenido de asfalto óptimo.

Una vez obtenida la D_{mm} para un determinado contenido de asfalto y calculada la densidad efectiva del agregado, calcule la D_{mm} de la mezcla para cualquier otro porcentaje de asfalto, de acuerdo a la fórmula:

$$D_{mm} = \frac{100 + P_b}{\frac{100}{\rho_E} + \frac{P_b}{\rho_b}}$$

donde:

- D_{mm} : Densidad máxima de la mezcla (kg/m^3).
- P_b : Porcentaje de asfalto referido al agregado (%).
- ρ_E : Densidad efectiva del agregado (kg/m^3), de acuerdo a 4.2.
- ρ_b : Densidad del asfalto (kg/m^3).

4.5 Contenido de Asfalto Util. El contenido de asfalto útil (P_{bu}) de una mezcla, corresponde al contenido de asfalto total menos el contenido de asfalto absorbido por el agregado. Se calcula de acuerdo a la fórmula:

$$P_{bu} = P_b - P_{ba}$$

donde:

- P_{bu} : Porcentaje de asfalto útil referido al agregado (%).
- P_b : Porcentaje de asfalto referido al agregado (%).
- P_{ba} : Porcentaje de asfalto absorbido referido al agregado (%).

4.6 Cálculo de los Vacíos en el Agregado Mineral. El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM), se calcula de acuerdo a la fórmula:

$$VAM = 100 \times \left(1 - \frac{G}{\rho_{RS}} \times \frac{100}{100 + Pb} \right)$$

donde:

- VAM : Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%).
- G : Densidad de la mezcla compactada (kg/m^3).
- ρ_{RS} : Densidad real seca del agregado (kg/m^3).
- Pb : Porcentaje de asfalto referido al agregado (%).

4.7 Cálculo del Porcentaje de Huecos de Aire en la Mezcla. El porcentaje de huecos de aire en la mezcla (V_a), se calcula de acuerdo a la fórmula:

$$V_a = 100 \times \frac{D_{mm} - G}{D_{mm}}$$

donde:

- V_a : Porcentaje de huecos de aire en la mezcla (%).
- D_{mm} : Densidad máxima de la mezcla (kg/m^3), de acuerdo a 4.4.
- G : Densidad de la mezcla compactada (kg/m^3).

4.8 Cálculo del Porcentaje de Huecos Llenos con Asfalto. El porcentaje de huecos llenos con asfalto (V_{LL}), se calcula de acuerdo a la fórmula:

$$V_{LL} = 100 \times \left(1 - \frac{V_a}{VAM} \right)$$

donde:

- V_{LL} : Porcentaje de huecos llenos con asfalto (%).
- V_a : Porcentaje de huecos de aire en la mezcla (%).
- VAM : Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%).

5.- Acondicionamiento de los Datos.

5.1 Los valores de estabilidad obtenidos para probetas de espesores distintos a 63,5 mm deben corregirse, convirtiendo éstos a un valor equivalente a 63,5 mm, utilizando para ello los factores de corrección indicados en Tabla 8.302.40.A del Método 8.302.40.

5.2 Calcule el valor promedio de la densidad, fluencia y estabilidad corregida, para todas las probetas con un mismo contenido de asfalto.

5.3 Confeccione los siguientes gráficos, uniendo mediante una curva suave todos los puntos obtenidos:

- a) Estabilidad v/s porcentaje de asfalto.
- b) Fluencia v/s porcentaje de asfalto.
- c) Densidad v/s porcentaje de asfalto.
- d) Huecos en la mezcla v/s porcentaje de asfalto.
- e) VAM v/s porcentaje de asfalto.

6.- Determinación del Contenido Óptimo de Asfalto.**6.1 Capa de Rodadura.**

- a) Determine el contenido óptimo de asfalto de la mezcla considerando las curvas de densidad, estabilidad y huecos en la mezcla. De dichas curvas se determinan los porcentajes de asfalto (Pb) que entreguen:
- Máxima estabilidad (Pb₁).
 - Máxima densidad (Pb₂).
 - Contenido de asfalto para un 5% de huecos (Pb₃).

El contenido óptimo de asfalto se calcula como la media aritmética de los tres valores obtenidos, es decir:

$$Pb_{\text{óptimo}} = \frac{Pb_1 + Pb_2 + Pb_3}{3}$$

- b) Verifique que el contenido óptimo de asfalto, con una tolerancia de $\pm 0,3$ puntos porcentuales, cumpla con todos los requisitos de calidad exigidos a la mezcla. En caso contrario, confeccione una nueva serie de muestras.

6.2 Capa de Base y Capa Intermedia (Binder). Seleccione como contenido óptimo de asfalto el porcentaje de ligante que, con una tolerancia de $\pm 0,5$ puntos porcentuales, cumpla con todos los requisitos de calidad exigidos a la mezcla.

7.- Informe. El informe debe incluir lo siguiente:

7.1 Identificación de los Materiales. Indique procedencia, lugar y fecha de muestreo, tanto del asfalto como del agregado.

7.2 Agregados. Indique los siguientes análisis para cada agregado:

- a) Granulometría.
- b) Densidad Aparente Suelta.
- c) Densidad Real Seca.
- d) Densidad Neta.
- e) Desgaste de Los Angeles.
- f) Índice de Plasticidad.
- g) Equivalente de Arena.
- h) Cubicidad de Partículas.
- i) Dosificación de Agregados.
- j) Granulometría de la Mezcla de Agregados.

Nota 1: En la confección del informe se debe incluir las correspondientes especificaciones de obra.

7.3 Asfalto.

- a) Certificados de Control de Calidad.
- b) Densidad.

7.4 Mezcla Agregado Pétreo – Asfalto.

- a) Densidad Máxima de la Mezcla.
- b) Adherencia.
- c) Porcentaje de Asfalto Absorbido Referido al Agregado.
- d) Temperatura de Mezclado.
- e) Temperatura de Compactación de las Probetas.

7.5 Análisis Marshall.

- a) Para cada contenido de asfalto considerado se debe incluir:
 - Densidad.
 - Huecos en la Mezcla.
 - Vacíos en el Agregado Mineral (VAM).
 - Estabilidad.
 - Fluencia.
- b) Gráficos de Densidad, Huecos, VAM, Estabilidad y Fluencia con respecto a cada uno de los porcentajes de asfalto considerados.
- c) Fórmula de Trabajo. Esta comprende:
 - Banda de Trabajo, con las siguientes tolerancias:

Tamiz 5 mm (N° 4) y superiores.	: ± 5 puntos porcentuales.
Tamices 2,5 mm (N° 8) y 1,25 mm (N° 16).	: ± 4 puntos porcentuales.
Tamices 0,63 mm (N° 30) y 0,315 mm (N° 50).	: ± 3 puntos porcentuales.
Tamiz 0,16 mm (N° 100).	: ± 2 puntos porcentuales.
Tamiz 0,08 mm (N° 200).	: ± 1,5 puntos porcentuales.
 - Contenido Óptimo de Asfalto para Capas de Rodadura. : ± 0,3 puntos porcentuales.
 - Contenido Óptimo de Asfalto para Capas de Base o Intermedia : ± 0,5 puntos porcentuales.
 - Densidad de Diseño.
 - Temperatura de Mezclado.
 - Temperatura de Inicio de Compactación.

Nota 2: La banda de trabajo podrá salirse de la especificada siempre que la curva granulométrica de diseño quede totalmente comprendida en la banda especificada.

Apéndice 3: Numeral 8.302.40 del Manual de Carreteras, volumen 8. *“Método para determinar la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas utilizando el aparato Marshall”* (en página siguiente).

8.302.40 ASFALTOS: METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA DEFORMACION PLASTICA DE MEZCLAS ASFALTICAS UTILIZANDO EL APARATO MARSHALL*

1.- Alcances y Campo de Aplicación. Este método describe la medición de la resistencia a la deformación plástica de probetas cilíndricas de mezclas asfálticas, cargadas sobre su manto lateral, usando el aparato Marshall. Este método es aplicable a mezclas asfálticas con agregado pétreo de tamaño máximo 25 mm.

*El Método 8.302.40 es una adaptación de la Norma AASHTO T 245 - 82.

2.- Equipos.

2.1 Moldes de Compactación. Constituidos por una placa base, molde y collar. El molde debe tener un diámetro interior de $101,6 \pm 0,1$ mm y una altura de 80 mm; la placa base y el collar se diseñan de modo de poder ajustarse a cualquier extremo del molde, conforme a los detalles de la Lámina 8.302.40.A, Figura 1.

2.2 Extractor. Que sirva para sacar las probetas del molde; debe estar provisto de un disco desplazador de 100 mm de diámetro por 10 mm de espesor.

2.3 Martillo de Compactación. Consiste en una cara circular de 100 mm de diámetro equipada con un peso de 4.515 ± 15 g y construido de modo de obtener una altura de caída 460 ± 2 mm, conforme a los detalles de la Lámina 8.302.40.A, Figura 2. Las condiciones señaladas aseguran la obtención de una energía por caída de 20,75 J.

2.4 Pedestal de Compactación. Consiste en un poste de madera de 205 x 205 x 455 mm cubierto con una placa de acero de 305 x 305 x 25 mm. El poste va empotrado en hormigón mediante cuatro perfiles ángulo; debe quedar a plomo y la placa de acero debe quedar firmemente afianzada y a nivel. El poste puede ser de roble, pino u otra madera que tenga una densidad seca media de 0,67 a 0,77 g/cm³.

2.5 Sujetador de Molde. Consiste en un aro con resorte diseñado para mantener centrado y fijo el molde en el pedestal durante la compactación.

2.6 Mordaza. Consiste en dos segmentos de cilindro, superior e inferior, con un radio interno de $51 \pm 0,2$ mm, diseñado según la Lámina 8.302.40.B, para transmitir la carga a la probeta en el ensaye.

2.7 Máquina Marshall. Aparato eléctrico, diseñado para aplicar carga a las probetas durante el ensaye, a una velocidad de deformación de 50 ± 1 mm/min. Está equipada con un anillo de prueba calibrado para determinar la carga aplicada, de una capacidad superior a 25 kN y una sensibilidad de 45N con un dial graduado de 0,0025 mm y un medidor de flujo con una precisión de 0,01 mm, para determinar la deformación que se produce en la carga máxima. Se puede emplear también esta máquina equipada con sensor y registrador de estabilidad v/s fluencia.

2.8 Hornos. Horno de convección forzada y placas calientes, que deben incluir un termostato capaz de controlar y mantener la temperatura requerida dentro de ± 3 °C.

2.9 Baño de Agua. De a lo menos 150 mm de profundidad y controlado termostáticamente a 60 ± 1 °C. El estanque debe tener un fondo falso perforado y un termómetro centrado y fijo.

2.10 Equipo Misceláneo.

- a) Pailas para calentar el agregado.
- b) Recipiente, para calentar el asfalto.
- c) Bol, para mezclar el asfalto y agregado.
- d) Espátulas, para el mezclado manual de la mezcla.
- e) Mezclador mecánico, opcional.
- f) Termómetros de rango 10 a 200° C para determinar las temperaturas del agregado, asfalto y mezcla bituminosa.

- g) Balanzas con capacidad 5 de kg y sensibilidad 1 g.
- h) Poruñas.
- i) Guantes aislantes para resistir rango de temperatura indicadas en f) y guantes de goma.
- j) Pintura, tinta u otro elemento de marcación indeleble para identificar las probetas.

3.- Probetas de Ensaye

3.1 Número de Probetas. Prepare a lo menos 3 y de preferencia 5 probetas para cada contenido de asfalto.

3.2 Preparación del Agregado. Seque el agregado hasta masa constante, a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y sepárelo por tamizado en seco en las siguientes fracciones: 25-20 mm; 20-12,5 mm; 12,5-10 mm; 10-5 mm; 5-2,5 mm y bajo 2,5 mm.

3.3 Temperatura de Mezclado. Es la temperatura a la que debe calentarse el cemento asfáltico y el asfalto cortado para producir una viscosidad de 170 ± 20 cSt.

3.4 Temperatura de Compactación

- a) Para cementos asfálticos, la temperatura de compactación debe ser aquella a la cual el cemento asfáltico alcanza una viscosidad de 280 ± 30 cSt.
- b) Para asfaltos cortados, la temperatura de compactación debe ser aquella a la cual el asfalto cortado alcanza una viscosidad de 280 ± 30 cSt, después de perder 50% del solvente original.

3.5 Preparación de Muestras

- a) Pese en bandejas separadas para cada probeta de ensaye, la cantidad necesaria de cada fracción para producir una muestra que dé como resultado una probeta compacta de una altura aproximada de 65 mm; normalmente se requieren 1.100 g. Coloque las bandejas en el horno o en una placa caliente y llévelas a una temperatura de aproximadamente 30°C sobre la temperatura de mezclado especificada en 3.3 para cementos asfálticos, y de 15°C sobre dicha temperatura para asfaltos cortados. Coloque el agregado caliente en el bol de mezclado y revuelva completamente.
Forme un cráter en el agregado y pese la cantidad necesaria de cemento asfáltico o asfalto cortado e incorpórela al bol. En ese instante las temperaturas del agregado y del asfalto deben estar dentro de los límites establecidos en el Punto 3.3.
El asfalto no debe mantenerse a la temperatura de mezclado por más de 1 h antes de usarlo. Mezcle el agregado y asfalto tan rápido como sea posible, hasta que la mezcla quede totalmente cubierta y uniforme.
- b) Terminado el mezclado, coloque las mezclas con asfaltos cortados en un horno ventilado, mantenido a una temperatura de aproximadamente 10°C sobre la de compactación. Continúe el curado hasta que se haya evaporado 50% del solvente. La mezcla debe revolverse para acelerar el proceso de pérdida de solvente, teniendo cuidado de no perder mezcla. Durante este proceso, pese la mezcla inicialmente en intervalos de 15 min y, cuando se aproxime a la pérdida de 50%, en intervalos menores de 10 min.

3.6 Compactación de Probetas

- a) Prepare el molde y el martillo, limpiando completamente el conjunto del molde y cara del martillo de compactación y caliéntelos durante 15 min en un baño de agua o en una placa caliente a una temperatura próxima a la de compactación. Coloque un disco de papel, cortado a medida, en la parte inferior del molde antes de colocar la mezcla. Suavice la parte interior del molde y la cara del martillo con un aceite grueso. Coloque el conjunto collar, molde y base en el pedestal del compactador.
- b) Llène el molde con una espátula, acomodando la mezcla 15 veces en el perímetro y 10 veces en el centro. La temperatura antes de compactar debe estar en los límites establecidos en los Puntos 3.4 a) y b); si no es así, descártela. En ningún caso, la mezcla debe recalentarse.

- c) Con el martillo de compactación aplique 75 golpes en un tiempo no superior a 90 s. Saque la base y el collar, invierta y reensamble el molde. Aplique en la otra cara el mismo número de golpes en un tiempo no mayor al indicado. Después de compactar, saque la base y deje enfriar la probeta al aire. Si se desea un enfriamiento más rápido puede usar ventiladores. Normalmente la probeta se deja enfriar toda una noche.

Nota 1: Podrá especificarse una cantidad diferente de golpes, de acuerdo al tránsito de diseño.

3.7 Determinación de Densidad y Espesor. Tan pronto como la probeta se enfríe a temperatura ambiente, desmolde y determine su espesor. Luego proceda a determinar su densidad de acuerdo al Método 8.302.38.

4.- Procedimiento de Ensaye.

4.1 Para probetas confeccionadas con cementos asfálticos, coloque éstas en un baño de agua a $60 \pm 1^\circ$ C durante 30 a 40 min, antes de ensayar. Para probetas confeccionadas con asfaltos cortados, colóquelas en una corriente de aire por un lapso no inferior a 2 h; mantenga la temperatura del aire a $25 \pm 1^\circ$ C.

4.2 Limpie completamente la mordaza. La temperatura de ésta debe mantenerse entre 21 y 38° C, usando un baño de agua si es necesario. Lubrique las barras guías con una película delgada de aceite de modo que la parte superior de la mordaza deslice suavemente. Si se usa un anillo de prueba para medir la carga aplicada, asegúrese que el dial esté firmemente ajustado y en cero.

4.3 Saque la probeta del agua y seque cuidadosamente la superficie. Coloque y centre la probeta en la parte inferior de la mordaza, luego coloque la parte superior y centre el conjunto en el aparato de carga.

4.4 Aplique carga a la probeta a una velocidad constante de deformación de 50 ± 1 mm/min, hasta que se produzca la falla. El punto de falla queda definido por la carga máxima obtenida. Se define la estabilidad Marshall como el número total de newtons (N) necesarios para producir la falla de la probeta a 60° C, corregida de acuerdo a Tabla 8.302.40.A.

4.5 A medida que avanza el ensaye de estabilidad, sujete firmemente el medidor de flujo sobre la barra guía. Cuando se produzca la carga máxima, tome la lectura y anótela. Esta lectura es el valor de la fluidez de la probeta expresada en unidades de 0,25 mm (1/100 pulg). El procedimiento completo, estabilidad y fluencia, comenzando desde el momento en que se retira la probeta del agua, no debe durar más de 30 s.

5.- Informe. Además de la identificación de la obra (nombre del contrato y contratista), identificación y procedencia de los materiales (asfalto y agregado pétreo) y fecha del ensaye, el informe debe incluir lo siguiente:

- a) Carga máxima promedio (newton) de a lo menos 3 probetas, corregidas cuando sea necesario.
- b) Valor promedio de la fluidez (0,25 mm) de a lo menos 3 probetas.
- c) Temperatura de mezclado.
- d) Temperatura de compactación.

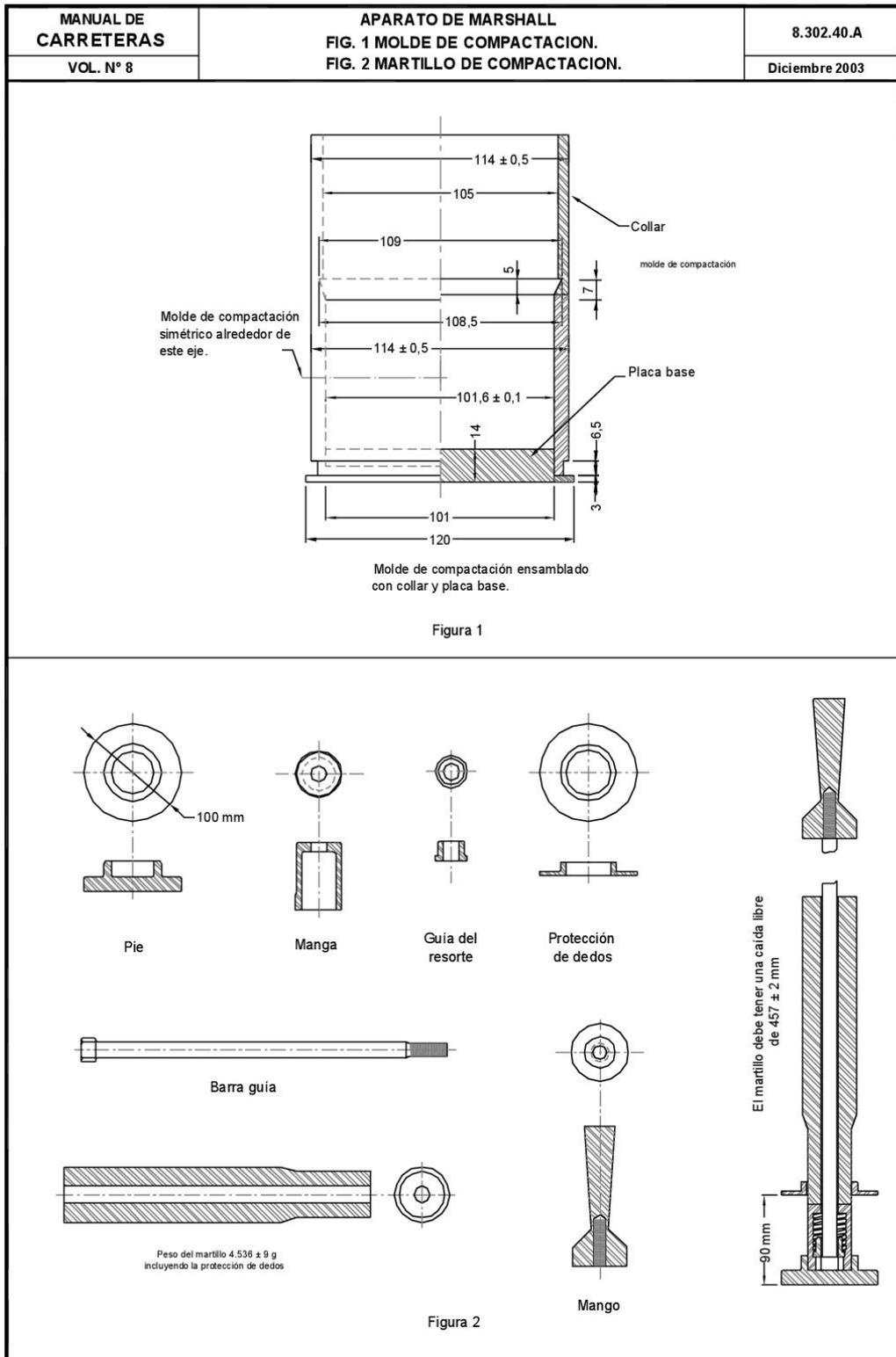
TABLA 8.302.40.A
FACTORES DE CORRECCION POR ALTURA PARA ESTABILIDAD
MARSHALL

ALTURA (mm)	FACTOR	ALTURA (mm)	FACTOR	ALTURA (mm)	FACTOR
31,5	3.902	36,5	3.030	41,5	2.246
31,6	3.884	36,6	3.014	41,6	2.234
31,7	3.867	36,7	2.999	41,7	2.223
31,8	3.850	36,8	2.983	41,8	2.211
31,9	3.833	36,9	2.968	41,9	2.199
32,0	3.815	37,0	2.952	42,0	2.187
32,1	3.798	37,1	2.936	42,1	2.175
32,2	3.780	37,2	2.921	42,2	2.163
32,3	3.763	37,3	2.905	42,3	2.151
32,4	3.745	37,4	2.889	42,4	2.139
32,5	3.728	37,5	2.874	42,5	2.128
32,6	3.710	37,6	2.858	42,6	2.116
32,7	3.693	37,7	2.843	42,7	2.104
32,8	3.675	37,8	2.827	42,8	2.092
32,9	3.658	37,9	2.811	42,9	2.080
33,0	3.640	38,0	2.796	43,0	2.070
33,1	3.623	38,1	2.780	43,1	2.060
33,2	3.605	38,2	2.763	43,2	2.050
33,3	3.588	38,3	2.745	43,3	2.040
33,4	3.570	38,4	2.728	43,4	2.030
33,5	3.554	38,5	2.710	43,5	2.020
33,6	3.538	38,6	2.693	43,6	2.010
33,7	3.522	38,7	2.675	43,7	2.000
33,8	3.506	38,8	2.658	43,8	1.990
33,9	3.490	38,9	2.640	43,9	1.980
34,0	3.474	39,0	2.623	44,0	1.970
34,1	3.458	39,1	2.605	44,1	1.960
34,2	3.442	39,2	2.588	44,2	1.950
34,3	3.426	39,3	2.570	44,3	1.940
34,4	3.410	39,4	2.553	44,4	1.930
34,5	3.394	39,5	2.535	44,5	1.920
34,6	3.378	39,6	2.517	44,6	1.912
34,7	3.362	39,7	2.500	44,7	1.904
34,8	3.346	39,8	2.486	44,8	1.896
34,9	3.330	39,9	2.471	44,9	1.888
35,0	3.311	40,0	2.457	45,0	1.879
35,1	3.293	40,1	2.443	45,1	1.871
35,2	3.274	40,2	2.428	45,2	1.863
35,3	3.255	40,3	2.414	45,3	1.855
35,4	3.236	40,4	2.399	45,4	1.847
35,5	3.218	40,5	2.385	45,5	1.839
35,6	3.199	40,6	2.371	45,6	1.831
35,7	3.180	40,7	2.356	45,7	1.823
35,8	3.161	40,8	2.342	45,8	1.814
35,9	3.143	40,9	2.328	45,9	1.806
36,0	3.124	41,0	2.313	46,0	1.798
36,1	3.105	41,1	2.299	46,1	1.790
36,2	3.086	41,2	2.284	46,2	1.782
36,3	3.068	41,3	2.270	46,3	1.774
36,4	3.049	41,4	2.258	46,4	1.766

ALTURA (mm)	FACTOR	ALTURA (mm)	FACTOR	ALTURA (mm)	FACTOR
46,5	1.758	51,5	1.435	56,5	1.216
46,6	1.750	51,6	1.430	56,6	1.213
46,7	1.742	51,7	1.425	56,7	1.209
46,8	1.734	51,8	1.420	56,8	1.205
46,9	1.726	51,9	1.415	56,9	1.201
47,0	1.718	52,0	1.410	57,0	1.198
47,1	1.710	52,1	1.405	57,1	1.194
47,2	1.702	52,2	1.400	57,2	1.190
47,3	1.694	52,3	1.395	57,3	1.187
47,4	1.686	52,4	1.390	57,4	1.184
47,5	1.678	52,5	1.386	57,5	1.181
47,6	1.670	52,6	1.381	57,6	1.178
47,7	1.663	52,7	1.377	57,7	1.174
47,8	1.656	52,8	1.373	57,8	1.171
47,9	1.649	52,9	1.368	57,9	1.168
48,0	1.643	53,0	1.364	58,0	1.165
48,1	1.636	53,1	1.359	58,1	1.162
48,2	1.629	53,2	1.355	58,2	1.159
48,3	1.622	53,3	1.351	58,3	1.156
48,4	1.615	53,4	1.346	58,4	1.153
48,5	1.608	53,5	1.342	58,5	1.149
48,6	1.601	53,6	1.338	58,6	1.146
48,7	1.594	53,7	1.333	58,7	1.143
48,8	1.588	53,8	1.329	58,8	1.140
48,9	1.581	53,9	1.324	58,9	1.137
49,0	1.574	54,0	1.320	59,0	1.134
49,1	1.567	54,1	1.316	59,1	1.131
49,2	1.560	54,2	1.311	59,2	1.128
49,3	1.554	54,3	1.307	59,3	1.124
49,4	1.549	54,4	1.303	59,4	1.121
49,5	1.543	54,5	1.298	59,5	1.118
49,6	1.538	54,6	1.294	59,6	1.115
49,7	1.532	54,7	1.289	59,7	1.112
49,8	1.526	54,8	1.285	59,8	1.109
49,9	1.521	54,9	1.281	59,9	1.106
50,0	1.515	55,0	1.276	60,0	1.103
50,1	1.509	55,1	1.272	60,1	1.099
50,2	1.504	55,2	1.268	60,2	1.096
50,3	1.498	55,3	1.263	60,3	1.093
50,4	1.493	55,4	1.259	60,4	1.090
50,5	1.487	55,5	1.254	60,5	1.087
50,6	1.481	55,6	1.250	60,6	1.084
50,7	1.476	55,7	1.246	60,7	1.081
50,8	1.470	55,8	1.243	60,8	1.078
50,9	1.465	55,9	1.239	60,9	1.074
51,0	1.460	56,0	1.235	61,0	1.071
51,1	1.455	56,1	1.231	61,1	1.068
51,2	1.450	56,2	1.228	61,2	1.065
51,3	1.445	56,3	1.224	61,3	1.062
51,4	1.440	56,4	1.220	61,4	1.059

ALTURA (mm)	FACTOR	ALTURA (mm)	FACTOR	ALTURA (mm)	FACTOR
61,5	1.056	66,4	0,936	71,3	0,834
61,6	1.053	66,5	0,934	71,4	0,832
61,7	1.049	66,6	0,932	71,5	0,830
61,8	1.046	66,7	0,930	71,6	0,829
61,9	1.043	66,8	0,928	71,7	0,828
62,0	1.040	66,9	0,925	71,8	0,826
62,1	1.037	67,0	0,923	71,9	0,825
62,2	1.035	67,1	0,920	72,0	0,824
62,3	1.032	67,2	0,918	72,1	0,823
62,4	1.029	67,3	0,915	72,2	0,821
62,5	1.027	67,4	0,913	72,3	0,820
62,6	1.024	67,5	0,910	72,4	0,819
62,7	1.021	67,6	0,908	72,5	0,818
62,8	1.019	67,7	0,905	72,6	0,816
62,9	1.016	67,8	0,903	72,7	0,815
63,0	1.013	67,9	0,900	72,8	0,814
63,1	1.011	68,0	0,898	72,9	0,813
63,2	1.008	68,1	0,895	73,0	0,811
63,3	1.005	68,2	0,893	73,1	0,810
63,4	1.003	68,3	0,890	73,2	0,808
63,5	1.000	68,4	0,888	73,3	0,806
63,6	0,998	68,5	0,886	73,4	0,804
63,7	0,995	68,6	0,884	73,5	0,802
63,8	0,993	68,7	0,883	73,6	0,800
63,9	0,990	68,8	0,881	73,7	0,798
64,0	0,988	68,9	0,879	73,8	0,796
64,1	0,985	69,0	0,877	73,9	0,794
64,2	0,983	69,1	0,875	74,0	0,792
64,3	0,980	69,2	0,873	74,1	0,790
64,4	0,978	69,3	0,871	74,2	0,788
64,5	0,975	69,4	0,869	74,3	0,786
64,6	0,973	69,5	0,868	74,4	0,784
64,7	0,970	69,6	0,866	74,5	0,782
64,8	0,968	69,7	0,864	74,6	0,780
64,9	0,965	69,8	0,862	74,7	0,779
65,0	0,963	69,9	0,860	74,8	0,778
65,1	0,960	70,0	0,858	74,9	0,776
65,2	0,958	70,1	0,856	75,0	0,775
65,3	0,956	70,2	0,854	75,1	0,774
65,4	0,954	70,3	0,853	75,2	0,773
65,5	0,953	70,4	0,851	75,3	0,771
65,6	0,951	70,5	0,849	75,4	0,770
65,7	0,949	70,6	0,847	75,5	0,769
65,8	0,947	70,7	0,845	75,6	0,768
65,9	0,945	70,8	0,843	75,7	0,766
66,0	0,943	70,9	0,841	75,8	0,765
66,1	0,941	71,0	0,839	75,9	0,764
66,2	0,939	71,1	0,838	76,0	0,763
66,3	0,938	71,2	0,836	76,1	0,761

Nota : La estabilidad medida de la probeta multiplicada por el factor correspondiente a su altura, es igual a la estabilidad corregida para una probeta de 63,5 mm.



**Apéndice 4: Numeral 5.413.205(2) del Manual de Carreteras, volumen 5,
“Ensaye de tracción indirecta (ITS)” (en página siguiente)**

5.413.205(2) Ensaye de Tracción Indirecta (ITS)

El ensaye de tracción indirecta (ITS) se realizará de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se fabricarán seis probetas de 4" de diámetro con equipo Marshall aplicando 75 golpes por cara, Método 8.302.40.
- Las probetas se desmoldarán después de 24 horas de fabricadas.
- Se colocarán las probetas sobre una bandeja plana y lisa y se curarán en un horno de aire forzado por 72 horas a 40°C.
- Las probetas serán removidas del horno después de las 72 horas y se dejarán enfriar a temperatura ambiente.
- Después de enfriar las probetas a temperatura ambiente, se determinará la densidad de cada probeta mediante medida geométrica según 8.302.38 del MC-V8. Como criterio general se excluirá cualquier probeta cuya densidad difiera del promedio en más de 50 kg/m³.
- A continuación tres de las probetas serán ensayadas a tracción indirecta (ITS) en condición seca y tres en condición saturada.
- El ensaye de ITS consiste en aplicar carga a las probetas a una velocidad de deformación de 50,8 mm/min sobre su eje diametral utilizando el cabezal de ruptura Lottman, hasta provocar la ruptura de la probeta. La falla debe provocarse en el eje axial de la probeta, si se provoca otro tipo de falla, la probeta deberá ser eliminada.
- Para determinar el ITS en condición seca se deberá proceder como sigue:
 - Ambientar la probeta en una cámara de aire a 25 ± 1 °C por al menos 1 hora, pero no más de 2 horas antes del ensaye.
 - Remover la probeta desde la cámara de aire y colocarla en el aparato de carga de forma tal que el pistón de carga quede paralelo y centrado sobre el plano vertical de la probeta.
 - Colocar el plato de transferencia de carga en la superficie centradamente y bajar el pistón de carga del dispositivo de ensaye de compresión.
 - Aplicar carga a la probeta a una velocidad de 50,8 mm/min hasta conseguir la máxima carga (falla en el eje axial de la probeta). Registrar esta carga P (en kN) con una precisión de 0,1 kN.
- Para determinar el ITS en condición saturada se deberá proceder como sigue
 - Saturar la probeta colocándola en un baño de agua a 25 ± 1 °C por 24 horas.
 - Remover la probeta, secar la superficie de modo de llevarla a condición saturada superficialmente seca.
 - Colocar la probeta en el aparato de carga de forma tal que el pistón de carga quede paralelo y centrado sobre el plano vertical de la probeta.
 - Colocar el plato de transferencia de carga en la superficie centradamente y bajar el pistón de carga del dispositivo de ensaye de compresión.
 - Aplicar carga a la probeta a una velocidad de 50,8 mm/min hasta conseguir la máxima carga (falla en el eje axial de la probeta). Registrar esta carga P (en kN) con una precisión de 0,1 kN.
- Calcular la ITS para cada probeta aproximando a 1 KPa, usando la siguiente fórmula :

$$ITS = \left(\frac{2 * P}{\pi * h * d} \right) * 10000$$

Donde : ITS : Tracción Indirecta en kPa
P : Carga Máxima aplicada en kN

h : Altura promedio de la probeta en cm.
d : Diámetro de la probeta en cm.

- El ITS seco será el promedio de los tres valores obtenidos a partir de probetas ensayadas en condición seca y el ITS saturado será el promedio de las tres probetas ensayadas en condición saturada, aproximando a 1Kpa.

5.413.205 (3) Cancha de Prueba

Al inicio de las faenas de reciclado de cada sección homogénea, se deberá realizar una cancha de prueba cuya longitud será definida por el Inspector Fiscal asesorado por el Laboratorio de Vialidad, destinada a probar el buen funcionamiento de los equipos, la secuencia de trabajo y las diferentes alternativas de compactación. Esta misma cancha de prueba servirá para obtener material reciclado, con el cual se verificará la dosificación del laboratorio y permitirá realizar los ajustes y correcciones necesarias. El ITS seco y saturado obtenido en esta cancha de prueba será en definitiva el que se utilice para el control de la mezcla en terreno.

5.413.3 PROCEDIMIENTOS DE TRABAJO

5.413.301 Equipos

El asfalto deberá ser incorporado mediante tanques móviles, los cuales deberán estar equipados con un termómetro que indique la temperatura de su contenido, una válvula de salida con un diámetro interior mínimo de 75 mm capaz de evacuar el contenido del tanque y un dispositivo de medición del volumen del contenido del tanque, calibrado a intervalos de no más de 100 l.

Cada tanque deberá poseer un certificado de carga que contenga la identificación del tanque, el peso neto del producto, el nombre del proveedor, número del lote y fecha de elaboración, temperatura a la cual el producto fue cargado y fecha, hora y lugar de carga.

El proceso de reciclado en frío, en sitio, mediante la tecnología de asfalto espumado deberá ser ejecutado con una máquina fresadora-recicladora, la cual deberá cumplir como mínimo lo siguiente:

- Un sistema de control en base a un microprocesador, que regule la aplicación de la dosis de agua de premezclado, dosis de agua para el proceso de espumado la espuma y dosis de asfalto en función de la velocidad de avance y la profundidad de corte.
- Un sistema apropiado para espumar asfalto en base a cámaras individuales de expansión. Este sistema deberá ser equipado con una boquilla de ensaye capaz de producir una muestra de asfalto espumado para evaluar sus propiedades.
- Un tambor pulverizador y mezclador que gire de manera ascendente en la dirección avance y que posea herramientas de corte para la fragmentación del material que se está reciclando.
- Un sistema de calefacción eléctrica que permita licuar el asfalto contenido en el sistema de asfalto espumado, con el objeto de evitar obstrucciones durante las interrupciones de la operación.

El equipo de compactación deberá estar constituido por rodillos lisos vibratorios de uno o dos tambores (tándem) y neumáticos pesados. El rodillo liso vibratorio será de amplitud y frecuencia variables y deberá tener a lo menos un peso de 11 toneladas y el rodillo neumático tendrá un peso mínimo de 23 toneladas, todos ellos en perfectas condiciones mecánicas, en especial en lo que se refiere a la suavidad de los arranques, paradas e inversiones de marcha. La cantidad de equipo que deberá disponer el Contratista se ajustará a los requerimientos de la obra. Eventualmente pueden requerirse rodillos "pata de cabra" para algunos suelos.

Además se requiere al menos de una motoniveladora y camiones de agua para mantener la humedad óptima de compactación del material.