



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**PAVIMENTOS ARTICULADOS DE
BLOQUES ASFÁLTICOS CON RAP Y
ANÁLISIS ESTRUCTURAL A TRAVÉS
DE UN MODELO FÍSICO
EXPERIMENTAL**

CARLOS RODOLFO MARÍN URIBE

Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
GUILLERMO THENOUX

Santiago de Chile, noviembre 2016

© 2016, Carlos Rodolfo Marín Uribe



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

PAVIMENTOS ARTICULADOS DE BLOQUES ASFÁLTICOS CON RAP Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL A TRAVÉS DE UN MODELO FÍSICO EXPERIMENTAL

CARLOS RODOLFO MARÍN URIBE

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

GUILLERMO THENOUX

CHRISTIAN LEDEZMA

ÁLVARO GONZÁLEZ

JONATHAN BARTON

ERWIN KOHLER

RAFAEL MENÉNDEZ

PAUL GARNICA

JORGE VÁSQUEZ

Para completar las exigencias del grado de Doctor en Ciencias de la
Ingeniería

Santiago de Chile, noviembre 2016

A mi esposa Marcela por su apoyo, paciencia, comprensión, amor y compartir todos los momentos vividos en esta etapa de mi vida. A mis padres, hermanos y suegros que desde la distancia no dejaron de alentar y aconsejar en todo momento. Infinitas gracias a todos por su estímulo.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Asfaltos Quilín, especialmente a Cristóbal Paúl y Sergio Yakovlef por el gran aporte y apoyo en la materialización de la pista de prueba.

Mi agradecimiento sincero a la empresa APSA S.A, especialmente a David Saldaña y Robinson Lucero por su apoyo a través de la participación en el proyecto con el Deflectómetro de Impacto.

Un agradecimiento particular a Víctor Rocco y su equipo de trabajo; Rosa Zúñiga, Gabriela Muñoz y Rodrigo Uribe en el Laboratorio Nacional de Vialidad. Estoy muy agradecido por su cooperación y apoyo prestado mediante los equipos de laboratorio de asfalto y ejecución de ensayos.

A la Escuela de Construcción Civil de la Pontificia Universidad Católica de Chile, especialmente a Pablo Maturana y Benjamín Navarrete por la confianza depositada en mí para ser parte de la Escuela como profesor, por darme su apoyo moral y brindarme la oportunidad económica para mi sostenimiento en Chile.

A mis colegas y compañeros del programa de Doctorado por los gratos momentos compartidos en esta larga temporada de formación.

A mi profesor supervisor, Guillermo Thenoux, por sus constantes críticas que contribuyeron a fortalecer el carácter y valorar enormemente la paciencia y perseverancia como grandes virtudes del ser humano y base fundamental para el logro de objetivos importantes.

Sinceros agradecimientos para los miembros de la comisión quienes con sus aportes ayudaron a consolidar un mejor trabajo y fortalecieron el proceso de formación doctoral.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	viii
INDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN	xv
ABSTRACT.....	xvii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Hipótesis.....	5
1.2 Objetivos y alcance del estudio.....	6
1.3 Metodología	7
1.4 Organización de la tesis.....	12
2 LA INGENIERÍA DE LOS PAVIMENTOS ARTICULADOS CON BLOQUES DE HORMIGÓN	14
2.1 Generalidades	14
2.2 Historia	15
2.3 Ventajas y limitaciones de los pavimentos articulados.....	20
2.3.1 Ventajas	20
2.3.2 Limitaciones.....	21
2.4 Características generales de un sistema de pavimento articulado.....	21
2.4.1 Tipo de base.....	22
2.4.2 Tamaño del bloque.....	23
2.4.3 Forma de colocación.....	23
2.4.4 Aplicaciones.....	24
2.5 Factores que influyen en el desempeño estructural de los pavimentos de bloques	27
2.5.1 Bloque	28
2.5.2 Factores constructivos.....	31
2.5.3 Cama de arena.....	35
2.5.4 Base	36

2.5.5	Sub-rasante y drenaje.....	37
2.6	Modelación estructural de los pavimentos articulados	38
2.6.1	Enfoque de la losa modificada.....	39
2.6.2	Enfoque de capas elásticas.....	39
2.6.3	Enfoque numérico	40
2.7	Diseño estructural de pavimentos articulados.....	40
2.7.1	Criterios de desempeño de un pavimento articulado	41
2.7.2	Caracterización de un pavimento articulado.....	43
2.8	Estimadores de la condición estructural de un pavimento articulado	45
2.9	Resumen del Capítulo	48
3	EL RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	50
3.1	Temas asociados al reciclado y propiedades del RAP	51
3.1.1	Ventajas y desventajas del reciclado	51
3.1.2	Tipos de reciclado	54
3.1.3	Propiedades del agregado	57
3.1.4	Propiedades del asfalto residual.....	58
3.1.5	Agentes rejuvenecedores para reciclado.....	59
3.2	Diseño y desempeño de mezclas con RAP	61
3.2.1	Mezcla del asfalto residual con el asfalto virgen.....	61
3.2.2	Máximo porcentaje de RAP a utilizar.....	64
3.2.3	Método de diseño de mezclas con RAP.....	68
3.2.4	Desempeño de las mezclas con RAP	71
3.3	Resumen del capítulo	82
4.	Diseño de la mezcla asfáltica con RAP para bloques.....	86
4.1	Materiales utilizados en el estudio	88
4.1.1	Agregado virgen	88
4.1.2	Material RAP	88
4.1.3	Propiedades del material combinado	89
4.1.4	Asfalto.....	90
4.2	Diseño de mezclas para bloques.....	91
4.2.1	Etapas 1. Diseño criterio de estabilidad	93

4.2.2	Etapa 2. Criterio de resistencia a la tracción.....	94
4.2.3	Etapa 3. Diseño para cumplir (verificar) durabilidad	96
4.2.4	Etapa 4. Fatiga y módulo	97
4.2.5	Etapa 5. Empleo del Polígono de Vacíos para verificar el contenido de asfalto en base a las propiedades volumétricas.....	99
4.3	Programa experimental y análisis de resultados	100
4.3.1	Etapa 1. Diseño para cumplir criterio de propiedades volumétricas (y estabilidad).....	101
4.3.2	Etapa 2. Diseño para cumplir criterio de resistencia.....	107
4.3.3	Etapa 3. Diseño para cumplir (verificar) criterio de durabilidad	123
4.3.4	Etapa 4. Fatiga y módulo	126
4.3.5	Etapa 5. Empleo del Polígono de Vacíos para verificar el contenido de asfalto en función de las propiedades volumétricas.....	134
4.4	Estimación del contenido óptimo de asfalto y contenido de RAP para el diseño de mezclas para bloques de asfalto	136
5.	DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN PAVIMENTO ARTICULADO DE BLOQUES ASFÁLTICO	142
5.1	Programa y resultados experimentales para el diseño de las dimensiones del bloque.....	142
5.1.1	Impronta de carga	143
5.1.2	Constructabilidad.....	146
5.1.3	Distribución de esfuerzos bajo la capa de rodado.....	147
5.2	Construcción del modelo físico experimental (pista de prueba)	149
5.2.1	Obtención de los bloques	151
5.2.2	Armado de la capa con bloques de asfalto.....	158
5.3	Análisis deflectométrico del pavimento articulado con bloques de asfalto	161
5.3.1	Métodos para analizar los datos de deflexión	163
5.3.2	Retro-cálculo del módulo resiliente de las capas del pavimento	164
5.3.3	Evaluación del aporte estructural de la capa de bloques según los cuencos de deflexión.....	166
5.4	Propuesta de diseño estructural para pavimentos de bloques asfálticos	184

5.4.1	Módulos elásticos de las capas del pavimento.....	184
5.4.2	Criterio de diseño.....	186
5.4.3	Cartas gráficas de diseño	187
5.5	Equivalencia de estructuras de pavimento: pavimento asfáltico tradicional vs pavimento de bloques asfálticos.....	190
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	193
6.1	Conclusiones asociado al estudio de mezclas asfálticas	193
6.2	Conclusiones asociadas al diseño del bloque.....	194
6.3	Conclusiones asociadas al diseño estructural del pavimento articulado	195
6.4	Conclusiones asociadas a la construcción (e industrialización).....	196
6.5	Conclusiones generales	198
6.6	Recomendaciones.....	199
7.	BIBLIOGRAFÍA	201
8	ANEXOS	212
	Anexo A: Modelación de pavimentos articulados.....	212
	Anexo B: Gestión de inventario y procesamiento del RAP.....	212
	Anexo C: Cálculo de la gravedad específica total del agregado del RAP	212
	Anexo D: Cálculo del contenido inicial (método del Instituto del Asfalto)	212
	Anexo E: Diseños Marshall	212
	Anexo F: Ensayos para las etapas de investigación (etapas 1 a 5)	212
	Anexo G: Definición del tamaño del bloque de asfalto.....	212
	Anexo H: Métodos para analizar los datos de deflexión	212
	Anexo I: Análisis deflectométrico – retrocálculo de los módulos de las capas del pavimento	212
	Anexo J: Propuesta de diseño estructural de un pavimento articulado con bloques de asfalto	212

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1-1: Matriz de consistencia de la investigación para el objetivo general y objetivos específicos principales.....	8
Tabla 1-2: Matriz de consistencia de la investigación para los objetivos específicos secundarios	9
Tabla 2-1: Definiciones básicas sobre bloques	23
Tabla 2-2. Criterios de deformación admisible para sub-rasante.....	42
Tabla 2-3. Propiedades de materiales para modelación de capas elásticas.....	43
Tabla 2-4. Correlaciones entre CBR y módulo resiliente de suelos.....	45
Tabla 2-5. Parámetros del cuenco de deflexión	47
Tabla 3-1: Efectos del contenido de RAP, contenido de humedad y temperatura de descarga sobre la temperatura de sobrecalentamiento de los agregados vírgenes.....	67
Tabla 3-2: Formulas básicas para el diseño de una mezcla asfáltica con RAP.....	69
Tabla 3-3. Factor "K" para el diseño de mezclas asfálticas con RAP.....	70
Tabla 3-4: Cuestionamientos sobre el desempeño de mezclas asfálticas con RAP.....	71
Tabla 4-1: Descripción de las granulometrías de estudio	90
Tabla 4-2: Matriz experimental de investigación.....	100
Tabla 4-3: Ahorro en el contenido de asfalto virgen a incorporar en una mezcla reciclada	107
Tabla 4-4: Contenido óptimo de asfalto Etapa 1 y 2.....	109
Tabla 4-5: Relación de resistencia a tracción SCB vs bloques de asfalto.....	114
Tabla 4-6: Contenidos óptimos de asfalto para la Etapa 3	124
Tabla 4-7: Resultados del análisis de regresión de la vida a fatiga.....	129
Tabla 4-8: Contenidos óptimos de asfalto para mezclas para bloques de asfalto	139
Tabla 5-1: Valores típicos para la caracterización de los materiales de un pavimento articulado para un solo bloque de asfalto	148
Tabla 5-2. Sub-tramos de construcción con distintos contenidos de RAP.....	153

Tabla 5-3: Configuración de los bloques utilizados para la construcción del tramo de prueba	158
Tabla 5-4: Escenarios para el análisis deflectométrico del pavimento	161
Tabla 5-5: Parámetros del cuenco de deflexión para bloques con patrón de colocación trabada	171
Tabla 5-6: Parámetros del cuenco de deflexión para bloques con patrón tipo alineado	174
Tabla 5-7: Parámetros del cuenco de deflexión según el patrón de colocación del bloque	177
Tabla 5-8: Parámetros del cuenco de deflexión según el patrón de colocación del bloque	180
Tabla 5-9: Coeficientes de regresión para la función de transferencia general de deformación de la sub-rasante	187

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1: Programa metodológico de investigación	11
Figura 2-1: Sección típica de un pavimento articulado.....	15
Figura 2-2: Conferencias SEPT (Elaboración propia)	16
Figura 2-3: Aplicación Municipal de pavimentos articulados.	17
Figura 2-4: Aplicación Institucional de pavimentos articulados.....	18
Figura 2-5: Aplicación Industrial de pavimentos articulados	18
Figura 2-6: Aplicación comercial de pavimentos articulados.....	19
Figura 2-7: Aplicación residencial de pavimentos articulados	19
Figura 2-8: Tipos de pavimentos articulados según características	22
Figura 2-9: Formas de colocación de los adoquines	24
Figura 2-10: Distintas aplicaciones funcionales de los pavimentos articulados.	25
Figura 2-11: Distintas aplicaciones estructurales de los pavimentos articulados.	25
Figura 2-12: Diferentes tipos de pavimentos permeables	26
Figura 2-13: Pavimentos articulados porosos	26
Figura 2-14: Variables que afectan el desempeño estructural de un pavimento de bloques	27
Figura 2-15: Áreas verticales que generan resistencia friccional.....	29
Figura 2-16: Puntos de contacto por rotación de un bloque.....	29
Figura 2-17. Algunas formas complejas de bloques	30
Figura 2-18. Patrones de colocación básicos	31
Figura 2-19. Esfuerzos en las zonas superior e inferior del bloque	32
Figura 2-20. Tipos de trabazón de los bloques.....	33
Figura 2-21. Consideraciones sobre el espesor de la cama de arena.....	36
Figura 2-22. Soluciones para el comportamiento de los pavimentos de bloques bajo carga	38
Figura 2-23. Concepto del ensayo FWD.....	46
Figura 3-1: Tipos de reciclado de pavimentos asfálticos	55
Figura 3-2: Tipos de mezclas asfálticas según la temperatura de fabricación	56

Figura 3-3: Agentes o aditivos ablandadores y rejuvenecedores del asfalto.....	60
Figura 3-4: Sistema de capas compuestas en mezclas asfálticas con RAP	62
Figura 3-5: Interacción entre el asfalto envejecido del RAP y el asfalto nuevo	63
Figura 3-6: Incremento de la temperatura de los agregados vírgenes según contenido de RAP en la mezcla	64
Figura 3-7: Incremento de la temperatura de los agregados vírgenes según contenido de RAP y su humedad en la mezcla	65
Figura 3-8: Temperaturas para calentar los agregados vírgenes para una temperatura de descarga de la mezcla de 149 °C	66
Figura 3-9: Efecto del contenido de RAP en la temperatura de descarga de la mezcla.....	67
Figura 3-10: Categorías para el desempeño de una mezclas asfáltica con RAP	72
Figura 4-1: Deformaciones del bloque de asfalto durante el almacenamiento	87
Figura 4-2: Separación por tamaños del agregado virgen.....	88
Figura 4-3: Acopio y separación por tamaños del RAP	89
Figura 4-4: Granulometrías utilizadas en la investigación.....	90
Figura 4-5: Etapas de la investigación	92
Figura 4-6: Indentación de una probeta asfáltica por carga de compresión.....	94
Figura 4-7: Conceptualización del ensayo SCB.....	95
Figura 4-8: Curva carga-desplazamiento del ensayo de tracción indirecta.....	99
Figura 4-9: Gravedades específicas totales del RAP para los tres métodos con el error estándar para un 95% de confiabilidad.....	103
Figura 4-10: Contenido de asfalto virgen a incorporar en las mezclas recicladas según el porcentaje de RAP empleado	104
Figura 4-11: Contenidos óptimos de asfalto según el criterio de Vacíos de Aire.....	105
Figura 4-12: Resistencia a la tracción mediante el ensayo SCB	110
Figura 4-13: Resistencia a la tracción mediante el ensayo ITS.....	110
Figura 4-14: Correlación de la resistencia a la tracción para los ensayos ITS vs SCB.....	112
Figura 4-15: Correlación resistencia a la tracción para todas las variables estudiadas.....	112
Figura 4-16: Resistencia a flexo-tracción de bloques de asfalto.....	113

Figura 4-17: Relación entre rigidez de la mezcla y la rigidez del asfalto	115
Figura 4-18: Resistencia a la tracción SCB según tipo de granulometría.....	117
Figura 4-19: Resistencia a la tracción ITS según tipo de asfalto	119
Figura 4-20: Resistencia a la tracción ITS según contenido de RAP en la mezcla.....	120
Figura 4-21: Variación de la rigidez del asfalto con el tiempo y temperatura	122
Figura 4-22: Relación de la resistencia a la tracción indirecta mediante el ensayo de sensibilidad a la humedad y contenidos óptimos de asfalto	125
Figura 4-23: Relación de resistencia a la tracción indirecta de mezclas asfálticas con RAP	126
Figura 4-24: Elaboración de muestras para ensayo a fatiga.....	127
Figura 4-25: Ensayo de fatiga de viga de cuatro puntos.	128
Figura 4-26: Efecto del contenido de RAP sobre la respuesta de deformación por tensión bajo pulsos de cargas repetitiva	129
Figura 4-27: Relación k_1 vs k_2 para todas las mezclas de estudio	130
Figura 4-28: Correlación Módulo dinámico vs IRT para todos las variables de estudio..	133
Figura 4-29: Comparación contenidos óptimos de asfalto para $V_a = 4\%$	136
Figura 4-30: Esquema para la elección del contenido óptimo de asfalto para la mezcla de bloques asfálticos	137
Figura 4-31: Contenido óptimo de asfalto según porcentaje de RAP en la mezcla	139
Figura 5-1: Improntas típicas empleadas para el diseño de pavimentos	144
Figura 5-2: Interacción tamaño del bloque e impronta del neumático.....	145
Figura 5-3: Comparación pesos de bloques asfálticos según sus dimensiones.....	147
Figura 5-4: Tensiones en un pavimento de bloques de distintos tamaños.	149
Figura 5-5: Localización de la zona de proyecto	150
Figura 5-6: Esquema de las pistas y abscisado del tramo de prueba.....	151
Figura 5-7: Escarpado del terreno	152
Figura 5-8: Conformación de la capa de base granular.....	152
Figura 5-9: Contenido de material reciclado (RAP) en los diferentes sub-tramos del proyecto.....	153

Figura 5-10: Acopio de material RAP en sus dos fracciones.....	154
Figura 5-11: Fabricación de las mezclas asfálticas con distintos contenidos de material reciclado (RAP)	154
Figura 5-12: Labores previas a la extensión de las mezclas asfálticas.....	155
Figura 5-13: Extensión y compactación de las mezclas asfálticas.....	156
Figura 5-14. Proceso de cortado de la capa asfáltica a. Cortadora para pavimento b. Cortes en ambas pistas	157
Figura 5-15: Retirado de los bloques obtenidos del corte del pavimento	157
Figura 5-16: Esquema de construcción de tramo de prueba	159
Figura 5-17: Construcción de la capa de rodadura articulada.....	160
Figura 5-18: Posición de los sensores del FWD	161
Figura 5-19: Deflectometría de impacto	162
Figura 5-20: Módulos de la capa de bloque retro-calculados para los distintos contenidos de RAP y la capa de adoquín.	165
Figura 5-21: Cuencos de deflexión según la carga aplicada (K0+017)	167
Figura 5-22: Deflexiones promedio normalizadas medidas para tres estados del pavimento a diferentes cargas aplicadas (K0+017)	168
Figura 5-23: Variación de la deflexión máxima según la aplicación de cargas.....	169
Figura 5-24: Cuencos de deflexión para un patrón de colocación tipo trabado.....	170
Figura 5-25: Comparación Número Estructural Efectivo patrón tipo trabado.....	170
Figura 5-26: Cuencos de deflexión para un patrón de colocación tipo alineado.	173
Figura 5-27: Comparación Número Estructural Efectivo tipo alineado.	174
Figura 5-28: Cuencos de deflexión según patrón de colocación y contenido de RAP en la mezcla del bloque	176
Figura 5-29: Número estructural efectivo según el patrón de colocación de los bloques.	177
Figura 5-30: Construcción de un tramo de pavimento articulado con bloques de hormigón	178
Figura 5-31: Cuencos de deflexión para el tramo con bloques de hormigón-adoquines ..	179
Figura 5-32: Número estructural efectivo para la capa de adoquines	180

Figura 5-33: Comparación cuencos de deflexión según tipología de bloques.....	182
Figura 5-34: Comparación de los Números Estructurales efectivos.....	183
Figura 5-36: Carta de diseño para nivel de servicio/categoría del camino "C"	
(Confiabilidad de diseño 80%)	189
Figura 5-37: Carta de diseño para nivel de servicio/categoría del camino "D"	
(Confiabilidad de diseño 50%)	189
Figura 5-38: Cartas de diseño para caminos tipo C	191
Figura 5-39: Cartas de diseño para caminos tipo D	192

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

PAVIMENTOS ARTICULADOS DE BLOQUES ASFÁLTICOS CON RAP Y
ANÁLISIS ESTRUCTURAL A TRAVÉS DE UN MODELO FÍSICO EXPERIMENTAL

Tesis enviada a la Dirección de Postgrado en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería.

CARLOS RODOLFO MARÍN URIBE

RESUMEN

Los pavimentos de los caminos de baja velocidad de proyecto (< 50 km/h) han utilizado como solución para su capa de rodadura, alternativas tradicionales como el asfalto, el hormigón, el bloque de hormigón o adoquín y la piedra pegada. La calidad y durabilidad de estas capas de rodado se han visto afectadas por distintas consideraciones como el grado de artesanía empleado para su construcción, las limitaciones impuestas por el área de pavimentación para el uso de maquinaria tradicional, un deficiente respaldo de estudios de diseño de ingeniería estructural y las dificultades constructivas.

La alternativa de los bloques de hormigón ha existido por muchos años por lo que se entiende que existe un nicho en el mercado de construcción de pavimentos en donde el asfalto no se presenta como alternativa o competencia en la modalidad de bloques. Una solución de pavimentación mediante bloques de asfalto obtenidos de manera industrializada otorga ventajas propias de la construcción prefabricada: terminación de construcción con mayor garantía de calidad, oportunidad para que la comunidad participe en la construcción del pavimento, posibilidad de almacenamiento de los bloques para futuras reparaciones y el diseño de las mezclas asfálticas para los bloques no requiere necesariamente cumplir con los criterios de diseño de una mezcla para pavimento continuo que son la fatiga, el ahuellamiento y la fisuración térmica, por lo que existe la oportunidad para incorporar material asfáltico recuperado (RAP) almacenado en grandes cantidades en las plantas de asfalto.

El objetivo de esta investigación es desarrollar la ingeniería de un pavimento de bloques de asfalto proponiendo una nueva metodología para el diseño de las mezclas asfálticas recicladas en caliente para el bloque y una evaluación de la respuesta estructural. Para lograr este objetivo se desarrolló un trabajo experimental en laboratorio y un trabajo de terreno. El trabajo experimental permitió investigar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas con y sin incorporación de RAP y el trabajo de terreno evaluó la respuesta estructural de un tramo de prueba de un pavimento con bloques de asfalto mediante un deflectómetro de impacto (FWD –Falling Weight Deflectometer).

Los resultados permitieron desarrollar una alternativa de pavimentación utilizando bloques de asfalto con incorporación de RAP con dos consideraciones fundamentales: se proponen nuevos criterios para el diseño de la mezcla para bloques asfálticos y se plantean soluciones de pavimentos articulados con respuestas estructurales equivalentes a un pavimento asfáltico tradicional utilizado en caminos de baja velocidad de proyecto. Los nuevos criterios para el diseño de la mezcla para bloque son: la resistencia a la tracción directa, la resistencia conservada y las propiedades volumétricas. También se proponen cartas gráficas para el diseño estructural con soluciones continuas para cualquier condición de capacidad de soporte de la subrasante y el número de ejes equivalentes al cual estará sometido el pavimento.

Miembros de la Comisión de Tesis Doctoral

Guillermo Thenoux

Christian Ledezma

Álvaro González

Jonathan Barton

Rafael Menéndez

Paúl Garnica

Jorge Vásquez

Santiago, noviembre, 2016

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

ASPHALT PAVING BLOCKS WITH RAP AND STRUCTURAL ANALYSIS
THROUGH A PHYSICAL MODEL EXPERIMENTAL

Thesis submitted to the Office of Graduate Studies in partial fulfillment of the
requirements for the Degree of Doctor in Engineering Sciences by

Carlos R. Marín

ABSTRACT

The pavements of low-speed project roads (< 50 km/h) have used traditional alternatives such as asphalt, concrete, concrete block or cobblestone and stuck stone as a solution for their wear surface. The quality and durability of these surface layers have been affected by different considerations such as the degree of craftsmanship used for their construction, the limitations imposed by the paving area for the use of traditional machinery, poor support of structural engineering studies and constructive difficulties.

The alternative of concrete blocks has existed for many years so it is understood that there is a niche in the pavement construction market where the asphalt is not presented as an alternative or competition in block mode. A solution of paving by means of asphalt blocks obtained in an industrialized way gives advantages of prefabricated construction: completion of construction with greater guarantee of quality, opportunity for the community to participate in the construction of the pavement, possibility of storage of the blocks for future repairs and the design of asphalt mixtures for blocks does not necessarily have to meet the design criteria of a continuous pavement mix such as fatigue, rutting and thermal cracking, so there is an opportunity to incorporate recovered asphalt material (RAP) stored in large quantities in asphalt plants.

The objective of this research is to develop the engineering of an asphalt block pavement by proposing a new methodology for the design of hot recycled asphalt mixtures for the block and an evaluation of the structural response. To achieve this objective, an experimental work was developed in the laboratory and a field work. The experimental work allowed to investigate the mechanical behavior of asphalt mixtures with and without incorporation of RAP and the field work evaluated the structural response of a test section of a pavement with asphalt blocks by means of a Falling Weight Deflectometer (FWD).

The results allowed to develop a paving alternative using asphalt blocks incorporating RAP with two fundamental considerations: new criteria for the design of the asphalt block mix and structural design solutions of articulated pavements with structural responses equivalent to a traditional asphalt pavement used on low-speed project roads are proposed. The new criteria for block mix design are: direct tensile strength, retained strength and volumetric properties. Structural charts are also proposed with continuous solutions for any condition of subgrade support capacity and the number of equivalent axes to which the pavement will be subjected.

Members of the Doctoral Thesis Committee:

Guillermo Thenoux
Christian Ledezma
Álvaro González
Jonathan Barton
Rafael Menéndez
Paúl Garnica
Jorge Vásquez

Santiago, november, 2016

1. INTRODUCCIÓN

Este estudio tiene su origen en un proyecto del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondef), organismo dependiente de la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (Conicyt) del Gobierno de Chile, el cual tenía como objetivo ayudar a mejorar la calidad de los pavimentos asfálticos utilizados en la pavimentación de caminos locales, de servicio, de desarrollo y/o participativos. Este tipo de caminos son diseñados para velocidades de proyecto inferiores a los 50 km/h (Dirección de Vialidad - Ministerio de Obras Públicas, 2016). Los aspectos principales considerados para esta problemática son:

- Los pavimentos de estos tipos de caminos utilizados en pavimentación urbana se resuelven con estructuras de asfalto de bajo espesor (5 a 7 cm). Estos pavimentos normalmente no consideran la alternativa de hormigón debido a que sus espesores son mayores debido a la fragilidad del material y aumentan los costos respecto de la alternativa de asfalto.
- La construcción de los pavimentos para estos tipos de caminos generalmente realizada por empresas constructoras pequeñas, empleando tecnologías y sistemas constructivos básicos, lo cual podría otorgarle al proceso: variabilidad, probabilidades de falla y por lo tanto, menor durabilidad. Se podrían producir problemas en el transporte, colocación, extensión y compactación de las mezclas asfálticas.
- Los contratos de este tipo de proyectos son relativamente pequeños, y de bajo costo, lo que no permite a la empresa innovar o utilizar equipos y procesos de mejor calidad. También afecta el hecho que algunas pavimentaciones se realizan en pasajes y sitios estrechos para la operación de maquinaria pesada.

- La estructura de un pavimento se compone de varias capas y es la capa de asfalto (o capa de rodado) la que impone mayores exigencias de calidad que a veces resulta difícil alcanzar cuando los métodos empleados son más parecidos a métodos artesanales.
- La durabilidad de un pavimento también depende de los espesores de capa. Para el caso de pavimentos asfálticos de caminos locales, de servicio, de desarrollo y/o participativos, los espesores son por lo general de 5 cm. Si estos pavimentos son deficientemente contruidos se transforman en pavimentos muy susceptibles a fallas no solo por los aspectos relacionados a la calidad constructiva sino también al eventual paso de cargas pesadas (camiones repartidores, camiones de basura y otros).

Por un tema asociado a la oportunidad de financiamiento en donde la contraparte del proyecto Fondef fue la empresa Petropower, se plateó como primer objetivo desarrollar pavimentos articulados con bloques de asfalto contruidos con cenizas de combustión de lecho fluidizado (FBC) y emulsiones (las cenizas FBC corresponden a un sub-producto del proceso de generación de energía eléctrica de la empresa Petropower). El proyecto demostró la factibilidad del uso de bloques de asfalto, no obstante no se pudo dar continuidad al empleo de cenizas FBC debido a temas comerciales y de impacto ambiental.

Tomando en consideración los diferentes aspectos discutidos, se propuso continuar con la idea básica de la investigación pero en este caso utilizar material asfáltico recuperado - RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) y llevar adelante el presente proyecto, el cual como propuesta principal contempla estudiar y desarrollar los procesos de diseño de proyecto y construcción de pavimentos articulados empleando bloques de asfalto, considerando que su producción se realiza en un proceso industrializado con mezclas en caliente otorgando mayor garantía de calidad. Su aplicación sería para pavimentos de caminos locales, de servicio, de desarrollo y/o participativos, ciclovías, plazas, parques, veredas y estacionamientos.

El evaluar la idea de utilizar bloques de asfalto se tuvieron en cuenta otras consideraciones de ingeniería, tecnológicas y económicas, tales como:

- Existe por muchos años la alternativa del empleo de bloques de hormigón (adocretos), por lo cual se entiende que existe un nicho en el mercado de construcción de pavimentos en donde el asfalto no se presenta como alternativa o competencia en esta modalidad (bloques). Se considera que es posible competir técnica y económicamente con la industria de pavimentos articulados.
- Dentro de la alternativa de pavimentos de asfalto para caminos de baja velocidad de proyecto, existen los Tratamientos Superficiales. No obstante, esta alternativa constructiva por lo general no se recomienda en aplicaciones urbanas o proyectos pequeños y segmentados. Los Tratamientos Superficiales encuentra mayores ventajas en carreteras y caminos de Bajo Volumen de Tránsito
- Al resolver la construcción de la capa de rodado a través de bloques prefabricados, el problema se centra en la calidad constructiva de las bases granulares o cementadas. Este es un proceso más simple al de la construcción de una mezcla asfáltica y es posible garantizar un estándar mínimo de calidad bajo las condiciones que se construye un pavimento social.
- Los pavimentos en forma de bloques pueden ser contruidos de forma artesanal sin poner en riesgo la calidad de la superficie de rodado. Esto abre la oportunidad de permitir que la comunidad participe con sus recursos propios en la construcción de este tipo de pavimentos.
- Los pavimentos articulados de asfalto pueden tener uso no solo en caminos de baja velocidad de proyecto sino también en otras aplicaciones donde hoy los pavimentos de adocretos y baldosas encuentran su nicho de mercado: veredas, ciclo-vías, estacionamientos y en pavimentos industriales de carga moderada.

Basados en las consideraciones complementarias, se generó una amplia gama de temas y oportunidades que debían ser estudiadas e investigadas. La tesis Doctoral identificó y abordó estos temas y oportunidades con una visión de ingeniería más que con una visión científica. Los temas y oportunidades identificados se presentan a continuación.

- El diseño de mezclas asfálticas para la producción de bloques no requiere necesariamente cumplir con los criterios de diseño de una mezcla para un pavimento continuo. Un pavimento articulado de bloques de asfalto no experimenta los mismos problemas de un pavimento asfáltico tradicional (no se fatiga, no es susceptible al ahuellamiento, no experimenta retracción térmica a bajas temperaturas). Por lo tanto, se propone investigar otros criterios y procedimiento para el diseño de mezcla a ser utilizada en la fabricación de bloques de asfalto.
- Considerando que el bloque de asfalto se debe producir de forma industrializada en planta, se plantea la alternativa de incluir materiales reciclados. Inicialmente se consideró la utilización de RAP, vidrio, caucho y ceniza volante. El proyecto finalmente se concentró en el uso de RAP debido a las siguientes razones:
 - ✓ Las plantas de asfalto concentran importantes cantidades de material RAP pero no pueden hacer uso masivo de éste en la construcción de pavimentos tradicionales. Las normativas Chilenas son aún muy restrictivas respecto de adicionar materiales diferentes a los agregados tradicionales. El diseño de mezcla del bloque de asfalto no requiere cumplir con los mismos criterios de una mezcla tradicional por lo cual se abre una oportunidad de incorporar porcentajes significativos de material RAP.
 - ✓ Por otra parte, el empleo de otros materiales reciclados abre una ventana completamente diferente en la investigación. Se investigó el uso ceniza volante con emulsión asfáltica pero finalmente se decidió trabajar y perfeccionar el uso del RAP y el empleo de mezclas en caliente, para la

presente investigación. Por de pronto trabajar con la variabilidad del RAP ya constituye un problema de ingeniería importante.

- ✓ Se requiere hacer uso de la mayor proporción de RAP para contribuir a la reducción de emisiones de gases y consumo energético.
- El empleo de pavimentos articulados existe desde hace muchos años y se ha acumulado gran experiencia de ingeniería. En la actualidad los pavimentos articulados de bloques de hormigón han alcanzado un gran desarrollo y se han producido una significativa cantidad de publicaciones, por lo cual se propuso realizar una investigación tipo “bench marking” para planificar la investigación y desarrollo del:
 - ✓ Diseño del bloque
 - ✓ Diseño estructural del pavimento
 - ✓ Diseño del proceso constructivo del pavimento articulado
- El sistema de producción de bloques a nivel industrial también constituye un tema pero no se consideró como parte de la investigación. No obstante, hubo que diseñar más de un procedimiento para producir el bloque de asfalto a nivel de laboratorio como a nivel de obra. El diseño del procedimiento industrial queda fuera del alcance de la investigación pero se entregan propuestas y recomendaciones.

1.1 Hipótesis

De acuerdo con el planteamiento del problema se establece la siguiente hipótesis general para el proyecto:

“Un pavimento articulado con bloques de asfalto fabricados con material RAP presenta respuestas estructurales equivalentes a un pavimento de asfalto tradicional utilizado en caminos de baja velocidad de proyecto”.

1.2 Objetivos y alcance del estudio

El objetivo principal del estudio es investigar y desarrollar una alternativa de pavimento articulado con bloques de asfalto, incorporando material asfáltico recuperado (RAP) como materia prima en su producción, que presente respuestas estructurales equivalentes a un pavimento asfáltico utilizado en caminos de baja velocidad de proyecto.

Los objetivos específicos principales son:

- a. *Establecer una metodología para el diseño de mezclas asfálticas en caliente para bloques con la incorporación de RAP, proponiendo nuevos criterios de diseño considerando que las restricciones que imponen los diseños de mezclas tradicionales no aplicarían a este tipo de solución.*
- b. *Desarrollar la ingeniería para el diseño estructural de este tipo de pavimento articulados de modo de lograr una respuesta estructural equivalente o superior a un pavimento de asfalto, teniendo en cuenta los siguientes factores:*
 - Forma, fabricación e industrialización del bloque.
 - Arquitectura y patrones de colocación del bloque.
 - Proceso de construcción.

Adicionalmente el proyecto de investigación abrió otras oportunidades de investigación las cuales se establecieron como objetivos específicos secundarios.

- c. Estudiar y plantear nuevos criterios para el diseño de mezclas asfálticas y en particular incorporar la resistencia a la tracción directa.*
- d. Estudiar la factibilidad de utilizar la herramienta del polígono de vacíos para pre-determinar el contenido óptimo de asfalto en mezclas asfálticas con incorporación de RAP.*

1.3 Metodología

Las Tabla 1-1 y Tabla 1-2 presentan las matrices de consistencia tanto para el objetivo general, los objetivos específicos y secundarios de la investigación. En estas matrices se aprecia la relación que existe entre el problema abordado, los objetivos, la hipótesis, las variables estudiadas e indicadores propuestos.

Tabla 1-1: Matriz de consistencia de la investigación para el objetivo general y objetivos específicos principales

Problema de investigación	Hipótesis	Objetivos	Variables	Indicadores
La calidad de los pavimentos participativos o económicos de calles y pasajes	Un pavimento articulado con bloques de asfalto fabricados con material	<u>Objetivo general</u> Investigar y desarrollar una alternativa de pavimento articulado con bloques de asfalto, incorporando material asfáltico recuperado (RAP) como materia prima en su producción, que presente respuestas estructurales equivalentes a un pavimento asfáltico utilizado en caminos de baja velocidad de proyecto	Respuestas estructurales del pavimento articulado con bloques de asfalto.	Propuesta de diseño estructural de pavimentos articulados con bloques de asfalto incorporando RAP. Propuesta de diseño estructural de pavimentos con bloques de asfalto que presente respuestas estructurales equivalentes a un pavimento asfáltico tradicional.
	RAP presenta respuestas estructurales equivalentes que un pavimento asfáltico utilizado en un camino de baja velocidad de proyecto	<u>Objetivos específicos principales</u> ✓ Establecer una metodología para el diseño de mezclas asfálticas en caliente para bloques con la incorporación de RAP, proponiendo nuevos criterios de diseño considerando que las restricciones que imponen los diseños de mezclas tradicionales no aplicarían a este tipo de solución. ✓ Desarrollar la ingeniería para el diseño estructural de este tipo de pavimento articulados de modo de lograr una respuesta estructural en el rango elástico equivalente o superior a un pavimento participativo de asfalto.	• Contenido de RAP, contenido de asfalto, tipo de ensayo, temperatura de ensayo. • Forma, fabricación y patrones de colocación del bloque. • Proceso de construcción.	Criterios para el diseño de la mezcla asfáltica para bloque. Cartas gráficas de diseño estructural: • Para un pavimento de bloques de asfalto. • De equivalencia con un pavimento participativo de asfalto.

Tabla 1-2: Matriz de consistencia de la investigación para los objetivos específicos secundarios

Problema de investigación	Hipótesis	Objetivos	Variables	Indicadores
La calidad de los pavimentos participativos o económicos de calles y pasajes	Un pavimento articulado con bloques de asfalto fabricados con material RAP presenta respuestas estructurales equivalentes que un pavimento asfáltico utilizado en un camino de baja velocidad de proyecto	<u>Objetivos específicos secundarios</u> ✓ Estudiar y plantear nuevos criterios para el diseño de mezclas asfálticas y en particular incorporar la resistencia a la tracción directa. ✓ Estudiar la factibilidad de utilizar la herramienta del polígono de vacíos para pre-determinar el contenido óptimo de asfalto en mezclas asfálticas con incorporación de RAP.	Contenido de RAP, contenido de asfalto, tipo de ensayo, temperatura de ensayo. Gravedad Específica Total del agregado del RAP, Contenido de RAP, gravedad máxima teórica.	Contenido de asfalto que maximiza la resistencia a la tracción directa. Contenidos óptimos de asfalto según el Polígono de Vacíos y comparación con los óptimos de los diseños Marshall.

La planificación general del estudio se presenta en la Figura 1-1 en función de los objetivos planteados para el estudio. La revisión bibliográfica permitió estructurar un marco teórico con los principales aspectos relacionados con el objetivo general de la tesis. Se estudiaron y analizaron las siguientes temáticas: pavimentos articulados de bloques, principalmente bloques de hormigón o adoquines, el reciclado de pavimentos asfálticos, el material asfáltico recuperado (RAP) y la elaboración de mezclas asfálticas con incorporación de RAP. Para lograr esto, se consultó principalmente la documentación del SEPT (Small Element Pavement Technologist) y las revistas indexadas más sobresalientes en el tema de los pavimentos asfálticos.

Para la investigación y desarrollo de las mezclas asfálticas con y sin incorporación de RAP, se realizó principalmente un estudio experimental utilizando los equipos que permitieran evaluar las propiedades de las mezclas propuestas en cinco etapas de investigación, las cuales permitieron dar respuesta al primer objetivo específico y los objetivos secundarios planteados. Los equipos utilizados en estas etapas son: compactador Marshall, prensa Marshall, viga de cuatro puntos y el equipo para la medición del módulo dinámico.

Para la evaluación estructural del pavimento articulado con bloques de asfalto se diseñó y construyó, en terreno, un modelo físico experimental a escala real que correspondió a un tramo de prueba de un pavimento articulado con bloques de asfalto. Se utilizaron cuatro escenarios de pavimentos para su análisis estructural utilizando un deflectómetro de impacto (FWD – Falling Weight Deflectometer) para las mediciones deflectométricas. Los escenarios corresponden a una estructura de pavimento en las siguientes etapas de su construcción: con base granular, con capa asfáltica continua, con capa asfáltica cortada y con capa de bloques de asfalto armados.

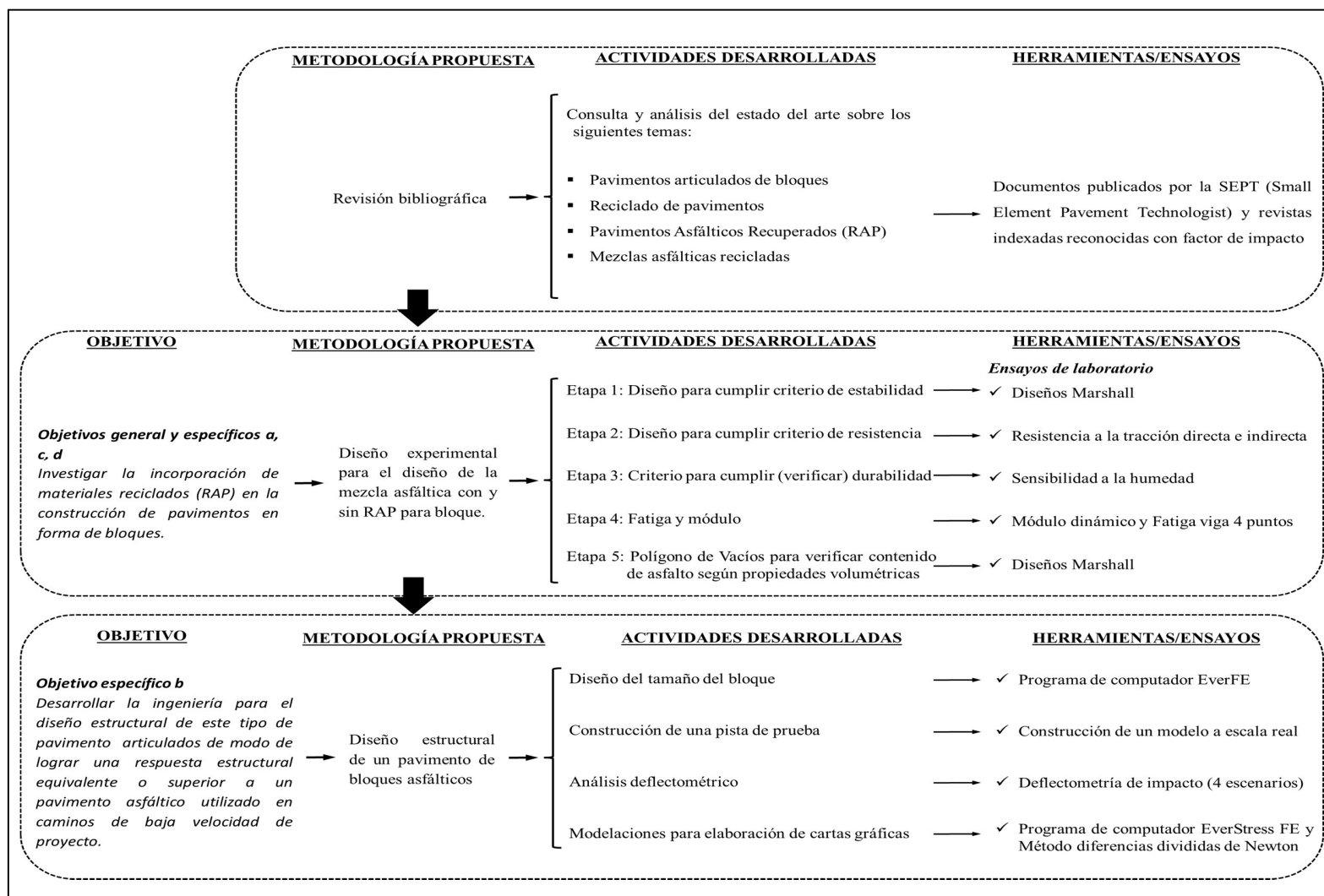


Figura 1-1: Programa metodológico de investigación

Tanto para las modelaciones estructurales del bloque de asfalto como para la construcción de las cartas de diseño estructural se utilizaron distintos programas de computador existentes en el mercado y herramientas matemáticas que facilitaron los cálculos y su interpretación. Se empleó el programa EverFe 2.25 basado en los elementos finitos para modelar el bloque de asfalto, el programa EverStress FE (programa basado en los elementos finitos para el diseño de pavimentos asfálticos) y el método numérico de las diferencias divididas o polinomio interpolante de Newton para la construcción de las cartas gráficas de diseño. La evaluación estructural con el FWD en conjunto con las modelaciones estructurales permitió dar respuesta al segundo objetivo específico.

1.4 Organización de la tesis

La tesis consiste de 8 capítulos. El capítulo 1 corresponde a la introducción, en el cual se expone el origen, la justificación y el planteamiento del problema de investigación. También se explicitan los objetivos, la hipótesis y la metodología empleada para la investigación.

Los capítulos 2 y 3 estructuran el marco teórico del trabajo. El capítulo 2 corresponde a una revisión del estado del arte sobre la ingeniería de los pavimentos articulados con bloques de hormigón y se discuten los aspectos considerados más importantes relacionados con el problema de investigación. En el capítulo 3 se presenta una revisión de literatura respecto del reciclado de los pavimentos, principalmente enfocado en el material recuperado de pavimentos asfálticos comúnmente conocido como RAP (Reclaimed Asphalt Pavement).

Los capítulos 4 y 5 son los capítulos experimentales de este trabajo y responden a los objetivos de la investigación. El capítulo 4 describe y analiza detalladamente el programa experimental desarrollado en el laboratorio para el diseño, ensayo y análisis

de las mezclas asfálticas sin y con incorporación de RAP. El capítulo 5 describe el proceso de construcción de un modelo experimental de terreno, y analiza los resultados de ensayos de deflectometría de impacto. También se desarrollan cartas de diseño estructural para pavimentos articulados con bloques de asfalto.

Las conclusiones y recomendaciones del estudio se presentan en el capítulo 6. El capítulo 7 corresponde a la bibliografía utilizada durante el desarrollo de la investigación y para la elaboración de este documento, y finalmente los anexos son presentados en el capítulo 8.

2 LA INGENIERÍA DE LOS PAVIMENTOS ARTICULADOS CON BLOQUES DE HORMIGÓN

Este capítulo tiene como objetivo presentar el estado del arte de los pavimentos articulados; específicamente, pavimentos con bloques de hormigón debido a que existe escasa literatura referente a la ingeniería de pavimentos articulados con bloques de asfalto. En relación a la literatura de pavimentos articulados con bloques de asfalto se reconoce principalmente las investigaciones de Abdelgalil & Nor (2014), Jenkins (2000), Armijos (2011) y por la empresa HANOVER de los Estados Unidos (HANOVER, s.f).

2.1 Generalidades

Un pavimento articulado es una estructura con una *superficie* compuesta por una capa de bloques individuales y elementos de confinamiento contruidos sobre una base estructural (Figura 2-1). Los bloques que componen la superficie se consiguen en el mercado en una variedad de formas y colores, y son elaborados con mínimas tolerancias para asegurar su trabazón (Chandra & Kumar, 2002a). Generalmente son de 20 a 25 cm de largo y 10 a 12 cm de ancho. Los espesores varían entre un rango de 6 cm a 12 cm dependiendo de la intensidad del tránsito. Usualmente son instalados sobre una cama de arena de 2 a 4 cm de espesor, separados por juntas rellenas con arena de entre 2 a 4 mm (Meng Chua, Askree, & Shackel, 2002). La *base* estructural puede ser una capa granular de CBR > 100% o una base estabilizada. La *sub-base* o plataforma de trabajo es una capa granular de menor calidad que la base, la cual brinda una superficie de trabajo estable para construir la capa de base. La *sub-rasante* corresponde al suelo natural o extendido artificialmente sobre el cual se construye la estructura del pavimento.

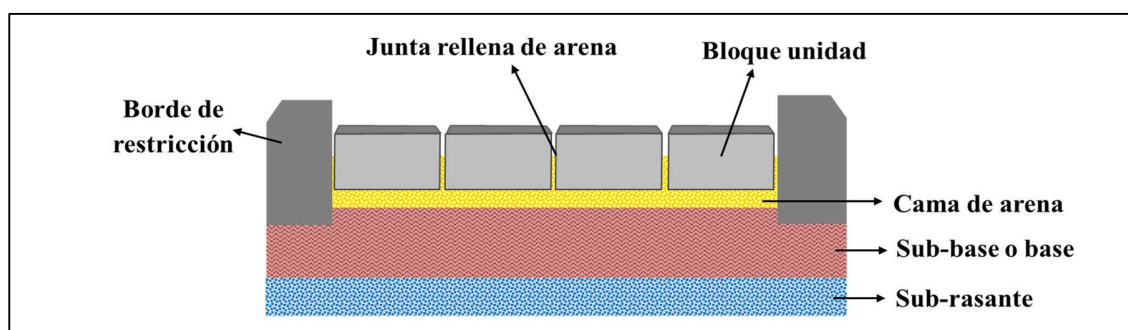


Figura 2-1: Sección típica de un pavimento articulado

2.2 Historia

El concepto de pavimento articulado se remonta desde el Imperio Romano en donde se construía con elementos unitarios fuertemente ajustados y puestos sobre una capa de base granular compactada. A través del tiempo se han utilizado distintos materiales para la fabricación de los bloques empleados para este tipo de estructuras, desde la roca pura con la que se construyeron las antiguas vías romanas, la arcilla cocida, la madera, el plástico y el hormigón.

Los bloques de hormigón fueron desarrollados en Holanda a fines de 1940 como un reemplazo de las calles de ladrillos de arcilla (Van der Vlist, 1980), (ICPI, 2003). Aunque los pavimentos articulados de bloques de hormigón tienen una larga historia en Europa, fue solo hasta mediados de 1960 que este tipo de pavimento se estableció en el Sur y Centro de América, y en Sudáfrica. Durante los años 1970s se introdujo en Inglaterra, Canadá, Estados Unidos, Australia, Nueva Zelanda y Japón (Shackel, 2003). La resistencia, durabilidad y la posibilidad de configurar superficies decorativas y atractivas han hecho del bloque un elemento ideal para diversas aplicaciones comerciales, urbanas e industriales. Se estimó que para el año 2003 aproximadamente 65 millones de $m^2/año$ de unidades de bloques de hormigón se producían en Norte América (Tighe, Chung, Burak, & Smith, 2006).

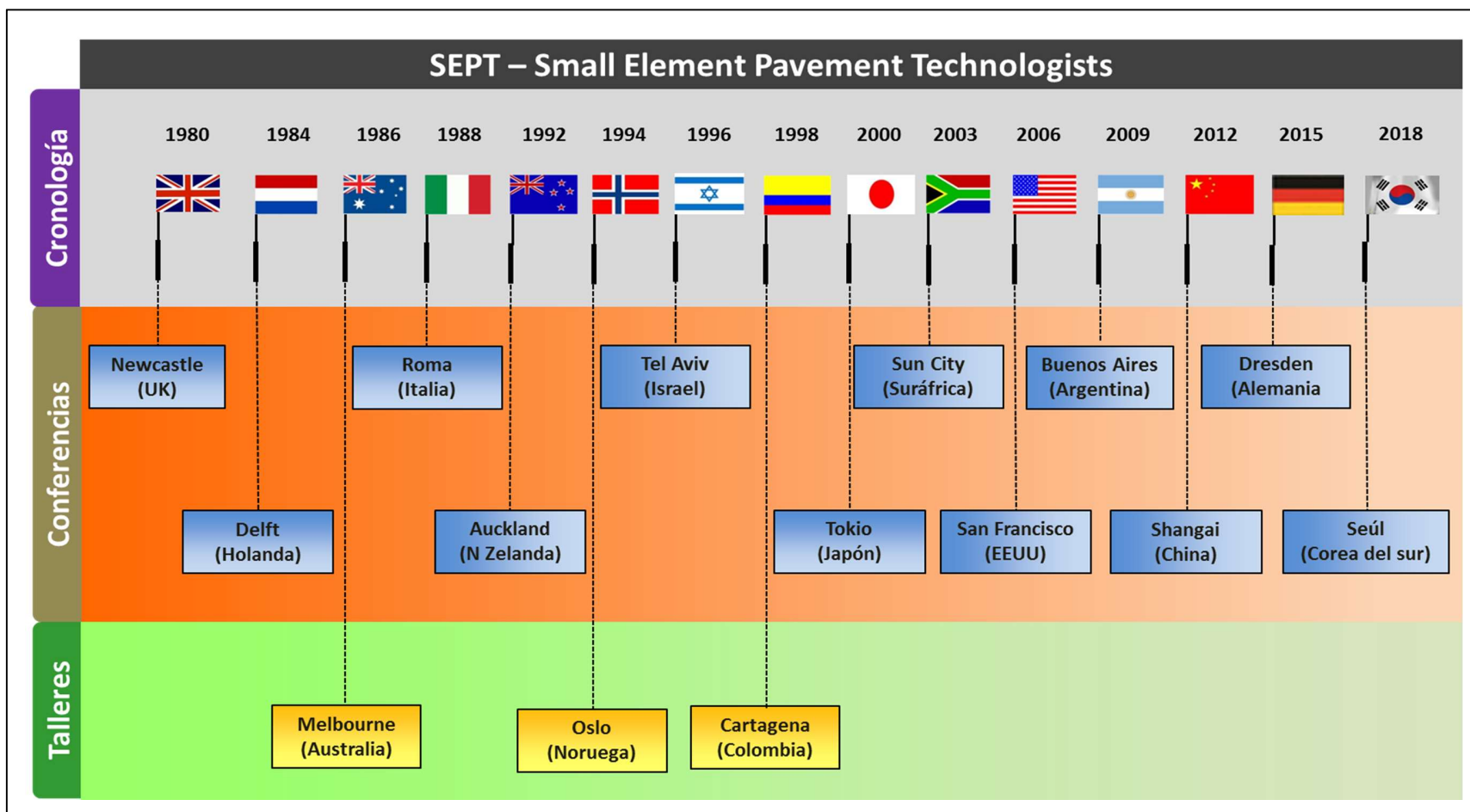


Figura 2-2: Conferencias SEPT (Elaboración propia)

Durante los últimos 60 años se han llevado a cabo un gran número de investigaciones logrando un desarrollo y refinamiento de la técnica del pavimento articulado. Son un ejemplo países como Argentina, Australia, Canadá, Francia, Alemania, Israel, Japón, Holanda, Nueva Zelanda, Sudáfrica, Reino Unido y los Estados Unidos (Chandra & Kumar, 2002a). Muestra de ello, son los aportes al conocimiento y difusión del mismo a través de los distintos congresos, seminarios, publicaciones y jornadas de trabajo que se realizan en todo el mundo; por ejemplo los eventos organizados por “Small Element Paving Technologist” – SEPT, cuya cronología y lugares de realización se presentan en la Figura 2-2.

Diversas han sido las aplicaciones de los bloques en pavimentos articulados, persiguiendo objetivos diferentes, de acuerdo con las necesidades o requerimientos de un proyecto específico. Se pueden encontrar pavimentos articulados extendidos en zonas residenciales destinadas a tránsito peatonal o bajo tránsito vehicular hasta grandes solicitaciones de carga como los pavimentos portuarios o aeropuertos. Las Figura 2-3 a Figura 2-7 muestran diferentes aplicaciones.



Figura 2-3: Aplicación Municipal de pavimentos articulados.

a. Ciclovía en la ciudad de Midwest, Indianápolis (ICCYC , 2013)

b. Calle en Uruguay (OS Construcción, 2008)

Institucional: pavimentos utilizados en hospitales, universidades y museos.



a.



b.

Figura 2-4: Aplicación Institucional de pavimentos articulados

a. Universidad Eafit Medellín, Colombia (Madrid, 2010)

b. Universidad de Medellín, Colombia (propia)

Industrial: pavimentos utilizados en aeropuertos, puertos y patios de almacenamiento.



a.



b.

Figura 2-5: Aplicación Industrial de pavimentos articulados

a. Aeropuerto Internacional Christchurch, New Zealand (360° urban, 2011)

b. Puerto de Howland Hook, New York (ICPI, 2014)

Comercial: pavimentos utilizados en estacionamientos, plazas, edificios de oficina y complejos de entretenimiento.



a.



b.

Figura 2-6: Aplicación comercial de pavimentos articulados

a. Estacionamiento centro comercial, Rhode Island (ICPI, 2014)

b. Crown Center, Kansas (ICPI, 2014)

Residencial: pavimentos utilizados en entradas, huellas, patios, calles y piscinas



a.



b.

Figura 2-7: Aplicación residencial de pavimentos articulados

a. Paseo Andalucía, calle 107, Medellín, Colombia (Madrid, 2010)

b. Paseo Urbano Avenida Oriental, Medellín, Colombia (Madrid, 2010)

2.3 Ventajas y limitaciones de los pavimentos articulados

Un pavimento articulado presenta ventajas y limitaciones, y características específicas respecto de los pavimentos tradicionales contruidos con asfalto y hormigón.

2.3.1 Ventajas (ICPI, 2003)

- No experimentan fractura por fatiga.
- Una vez instalado el pavimento puede ser abierto inmediatamente al tránsito. No existen tiempos de espera para procesos de curado o similar.
- Los bloques de hormigón tienen alta resistencia a los ciclos de temperatura y a las sales de descongelamiento si la mezcla se dosifica de manera especial.
- Los bloques de hormigón presentan buena resistencia al deslizamiento, aunque su uso no es habitual en caminos de alta velocidad. Son recomendados para tráficos donde las velocidades oscilan como máximo entre 50 y 60 km/h (Cement & Concrete Association of New Zealand and New Zealand Concrete Masonry Association Inc, 1988).
- El bloque de hormigón no sufre daños debido a los productos derivados del petróleo.
- Se pueden reemplazar de manera fácil y rápida. Por ejemplo, se puede acceder fácilmente a los servicios que pasan por debajo de la estructura del pavimento (luz, agua, telefonía, gas, etc.).
- Pueden ser instalados de forma artesanal o mecánica permitiendo mejorar la productividad.

- Los bloques pueden ser reutilizados y/o reciclados reduciendo los desechos de materiales de la construcción.

2.3.2 Limitaciones

- Si no existe un adecuado y efectivo confinamiento de los bloques, éstos se pueden mover o generar espacios que disminuyen o impiden su trabazón reduciendo la capacidad estructural del pavimento.
- Se requieren programas de mantenimiento periódicos, particularmente para la limpieza de pasto o vegetación que crece en medio de las juntas. Estas actividades podrían incrementar los costos de mantenimientos de este tipo de estructuras.
- No son recomendados para tránsitos con velocidades mayores a los 60 km/h. La gran cantidad de juntas entre bloques pueden producir mayor ruido al contacto con el neumático y disminución del confort del usuario del camino.
- Debido a la posibilidad de colocación manual de la capa de bloques, se promueve la utilización de mano de obra no calificada que puede producir una mala calidad en la construcción. Por lo tanto, se requiere supervisión y aplicación de principios de ingeniería y construcción que garantice un buen producto final.

2.4 Características generales de un sistema de pavimento articulado

La literatura presenta varias formas de ordenar los tipos de pavimentos articulados (Unilock, s.f), (McQueen, Knapton, Emery, & Smith, 2012). Se propone la clasificación que se presenta en la Figura 2-8.

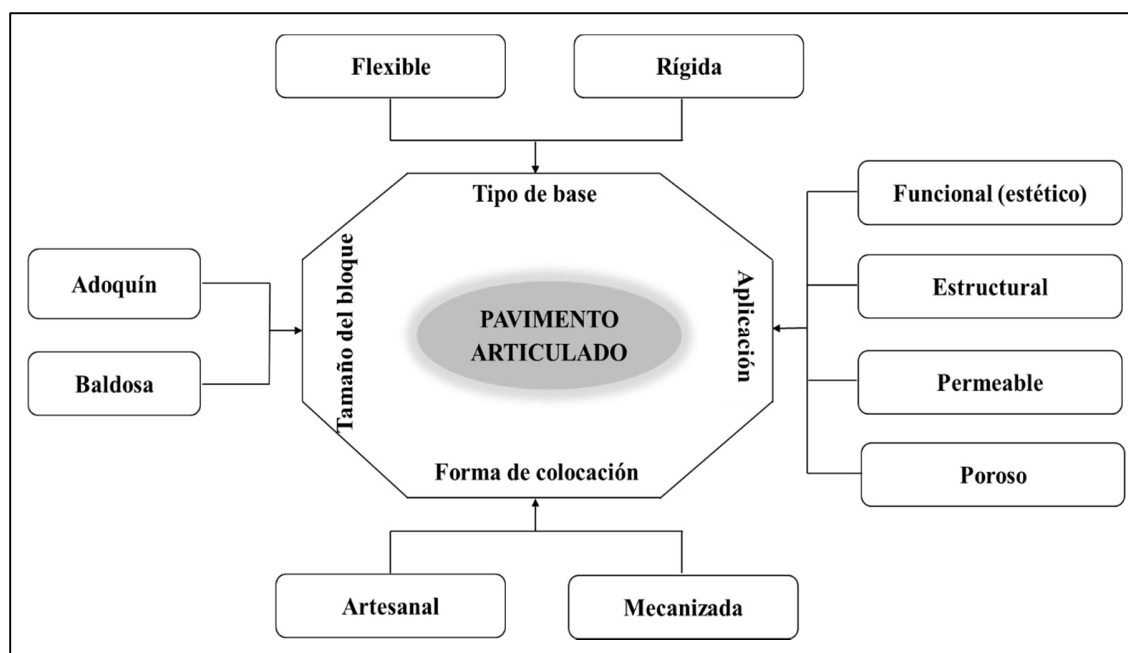


Figura 2-8: Tipos de pavimentos articulados según características

2.4.1 Tipo de base

Según el tipo de base, los pavimentos articulados pueden ser flexibles o rígidos. Se considera flexible cuando es construido sobre una base granular no ligada y se considera rígido cuando se construye sobre una base tratada con cemento o estabilizada con asfalto. Se recomienda el uso de una base tratada con cemento o estabilizada con asfalto cuando no sea posible conseguir materiales de alta calidad para construcción de la base o cuando se prevén problemas de inundaciones (problemas de drenaje).

2.4.2 Tamaño del bloque

La Tabla 2-1 presenta una definición básica sobre bloques según su tamaño. Se considera que un sistema de pavimento de baldosas no se debe diseñar de la misma manera que un sistema de pavimento con adoquines ya que los tipos de fallas son diferentes.

Tabla 2-1: Definiciones básicas sobre bloques (Shackel & Pearson, 2014)

Nombre del bloque según su tamaño	Definición
Adoquín	Elemento que cumple con las siguientes condiciones geométricas: ▪ Espesor: 60 – 120 mm ▪ Longitud < 280 mm ▪ Área < 0,08 m²
Baldosa	Elemento con un área mayor a los 0,08 m ²

2.4.3 Forma de colocación

Se refiere a la manera como se instalan los bloques y no se debe confundir con el patrón de colocación de los bloques. Se distinguen dos formas de colocación: artesanal y mecanizada. Esta última forma ha evolucionado considerablemente desde el punto de vista tecnológico mejorando la productividad en terreno. La Figura 2-9 muestra dos formas de colocación manual y dos tecnologías de colocación mecanizada.



Figura 2-9: Formas de colocación de los adoquines

- a. Manual (123RF, s.f) b. Manual con ayuda de pinza (Direct INDUSTRY, 2016)
 c. Maquinaria de extensión continua (DOGGUIE, s.f) d. Maquinaria de extensión por área de trabajo (TECNOGERMA, s.f)

2.4.4 Aplicaciones

Se pueden distinguir las aplicaciones del tipo estético/funcional, estructural, permeable y poroso.

- La aplicación estético (funcional) se refiere básicamente a la colocación de bloques de distintos colores, formas y tamaños, que además de cumplir con su funcionalidad se espera entreguen una visual estética. También puede prestar

algún servicio que no represente una alta carga vehicular como por ejemplo: vías peatonales, ciclorutas, separadores, veredas (Figura 2-10).



Figura 2-10: Distintas aplicaciones funcionales de los pavimentos articulados.

a. (Morcillo, 2015) b. (Villa de ladobe, 2014) c. (Madrid, 2010)

- Cuando la aplicación es *estructural* se espera que el bloque resista las cargas del tránsito, cumpliendo no solo función estética sino también estructural. Puede ser utilizado en calles, aeropuertos y puertos (Figura 2-11).

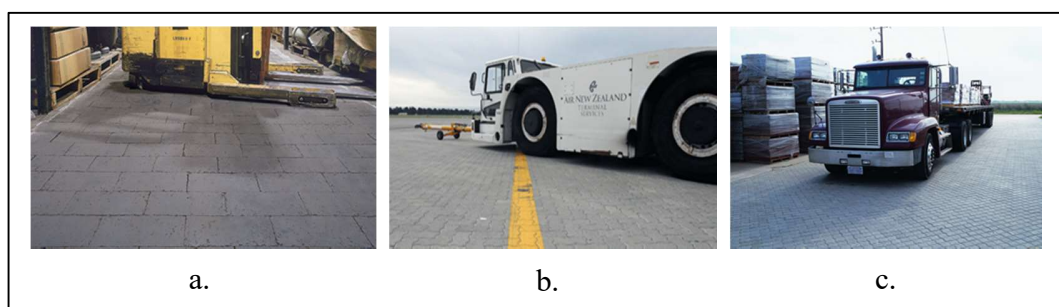


Figura 2-11: Distintas aplicaciones estructurales de los pavimentos articulados.

a. (HANOVER, s.f) b. (360° urban, 2011) c. (ICPI, 2014)

- La aplicación es *permeable* cuando se presentan espacios entre bloques o bloques con formas especiales que permiten el paso del agua pero a través de juntas o espacios generados por la misma forma del bloque (Figura 2-12).

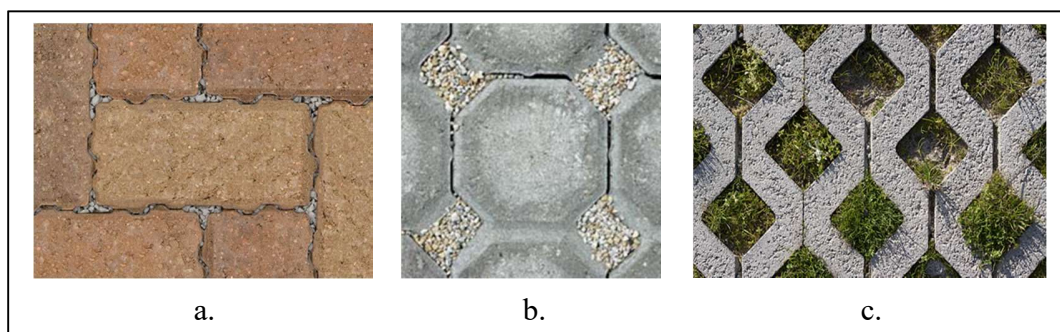


Figura 2-12: Diferentes tipos de pavimentos permeables

a. (Marshalls, 2015) b. (Natural Resources Defense Council, 2011) c. (Texture Images, 2013)

- La aplicación se considera *porosa* cuando el material que compone el bloque posee una granulometría específica que permite el paso del agua a través de su espesor (Figura 2-13).

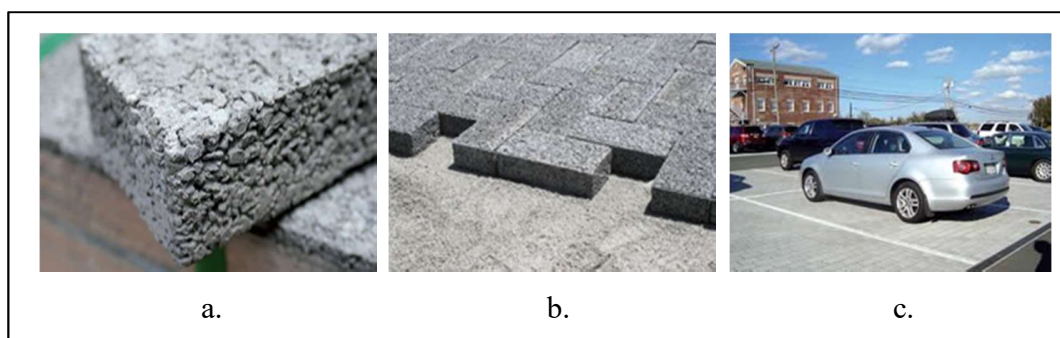


Figura 2-13: Pavimentos articulados porosos

a. (Mazzonetto, 2011) b. (Virgilis, s.f) c. (Mazzonetto, 2011)

2.5 Factores que influyen en el desempeño estructural de los pavimentos de bloques

Se han desarrollado ensayos de carga estática, de tráfico acelerado y modelos en terreno a escala para investigar cómo las distintas variables de diseño y construcción de un pavimento articulado afectan su desempeño en servicio. La Figura 2-14 resume las variables más importantes consideradas para el diseño de una estructura del tipo articulada, las cuales son descritas a continuación:

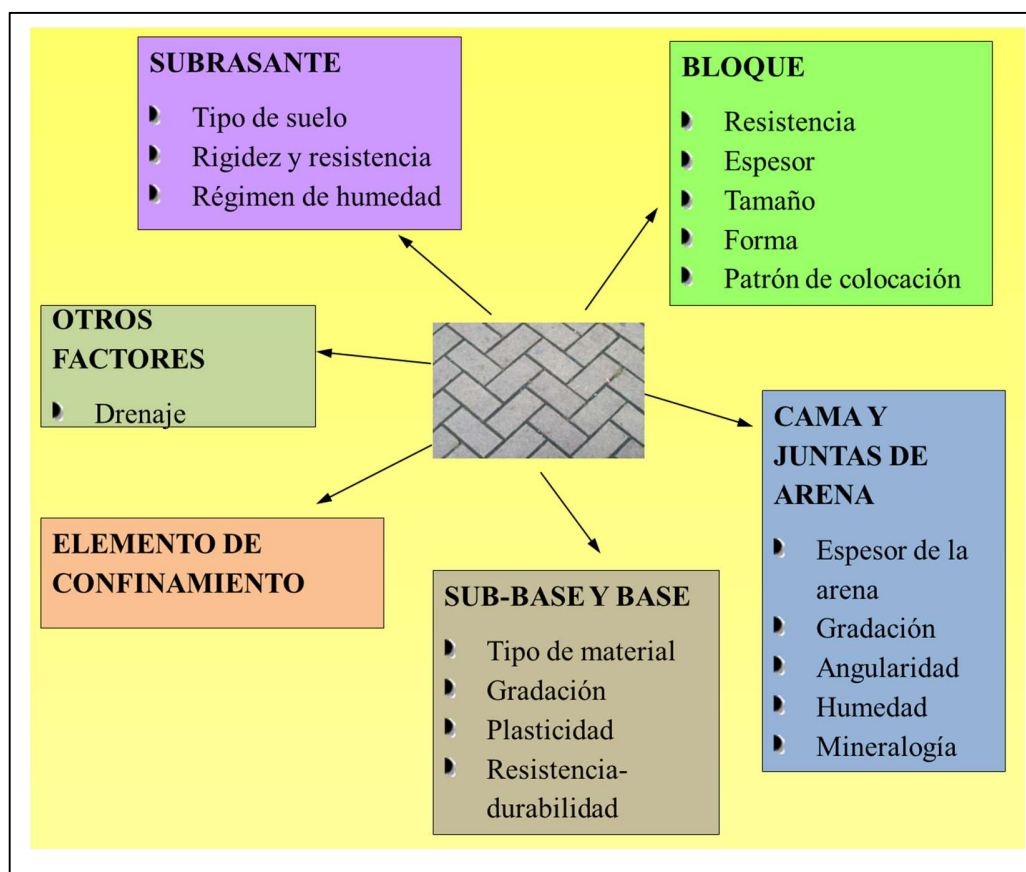


Figura 2-14: Variables que afectan el desempeño estructural de un pavimento de bloques

2.5.1 Bloque

Las características principales del bloque que intervienen en el desempeño de un pavimento articulado son: resistencia, espesor, tamaño, forma y su patrón de colocación.

a) Resistencia del bloque

Diversos investigadores (Panda & Ghosh, 2002; Knapton, 1976; Shackel, 1980) señalan que el desempeño estructural de los pavimentos articulados es independiente de la resistencia a la compresión de los bloques, por lo que no debiera ser considerado como un parámetro crítico para el diseño estructural del pavimento. Los requerimientos de las resistencias a la compresión y a la tracción se proponen para asegurar la durabilidad e indirectamente el desgaste, la resistencia al congelamiento y descongelamiento, y la resistencia al ataque de los sulfatos.

b) Espesor del bloque

La capacidad de disipar carga en profundidad es en parte función del espesor del bloque pero también se considera la dimensión plana y forma. A medida que el espesor del bloque aumenta, la deformación elástica del pavimento se reduce (Ahmed & Singhi, 2013). Esto se debe a dos razones fundamentales:

- Un bloque con mayor espesor exhibe una mayor resistencia friccional debido a una mayor área superficial vertical (Figura 2-15).

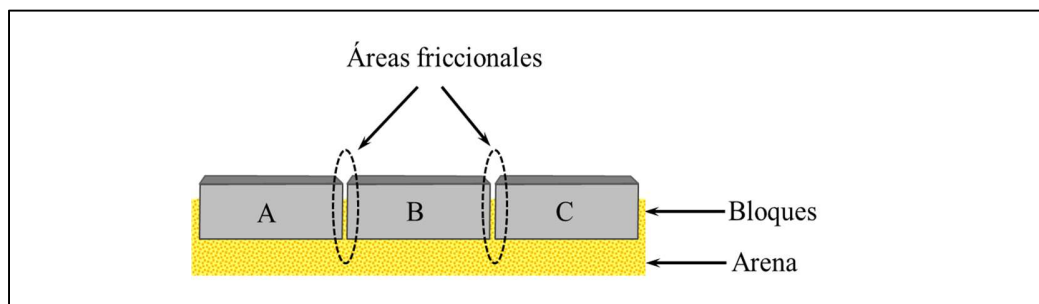


Figura 2-15: Áreas verticales que generan resistencia friccional

- La acción de empuje generada por la acción del tránsito produce un efecto de rotación en el bloque permitiendo que los “*puntos de contacto*” generados entre los bloques adyacentes sean más efectivos (Figura 2-16).

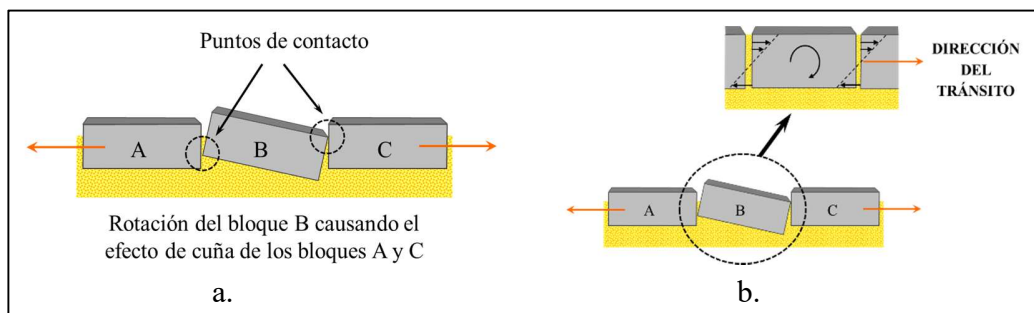


Figura 2-16: Puntos de contacto por rotación de un bloque

Dentro del rango de espesores usuales (80 – 100 mm) el efecto del espesor no es estructuralmente significativo. Un estudio realizado a bloques con distintos espesores muestra que el uso de bloques de 80 o 100 mm no mostraron diferencias significativas entre sí, pero con bloques de 60 mm la resistencia fue menor (Panda & Ghosh, 2002).

c) Tamaño del bloque

Las consideraciones más importantes respecto al tamaño del bloque para un pavimento son: la impronta de la rueda de carga que se relaciona directamente con la forma de transmitir la carga a las capas inferiores del pavimento, especialmente a la base estructural y el número de juntas que se logra con la capa de bloques, debido a que con bloques pequeños se tiene un mayor número de juntas por unidad de área comparado con bloques más grandes.

d) Forma del bloque

La influencia de la forma del bloque sobre la transferencia de carga ha sido un elemento de discusión (Shackel, 1990). La forma del bloque determina la cantidad de superficie de contacto vertical entre bloques en donde a mayor superficie de contacto mayor es el roce entre bloques y la distribución de los esfuerzos es más eficiente. Las formas irregulares, como las mostradas en la Figura 2-17, generan mayores puntos de contacto rotacional que le permiten mayor colaboración de carga de los bloques que quedan parcialmente por fuera de la impronta de carga y menores posibilidades de rotación y desprendimiento.



Figura 2-17. Algunas formas complejas de bloques (Fuente Propia)

2.5.2 Factores constructivos

a) Patrón de colocación de bloques rectangulares

La mayoría de los sistemas compuestos por bloques ofrecen distintas posibilidades en términos de orientación y de formas para ser extendidos sobre la superficie. Estas posibilidades ofrecen mayores efectos visuales y patrones, además de entregar comportamientos mecánicos diferentes de acuerdo con la orientación de las piezas (Escofet, 2014). Existen cuatro tipos básicos de patrones de colocación para bloques rectangulares, los cuales pueden también ser aplicados en otras formas de bloque. Ellos son: espina de pescado 90°, espina de pescado 45°, corredor y canasto (Figura 2-18).

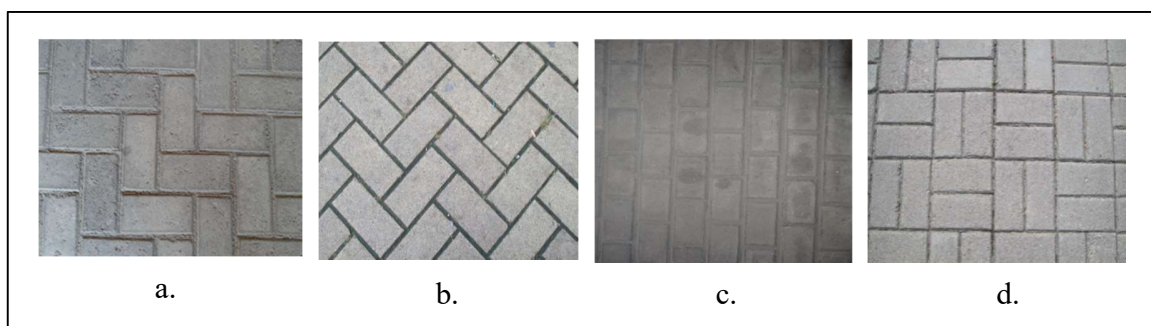


Figura 2-18. Patrones de colocación básicos

a. Espina de pescado 90° b. Espina de pescado 45° c. Corredor d. Canasto

Trabajos previos muestran que la capacidad de carga de un pavimento no se ve afectada por el patrón de colocación de los bloques (Panda & Ghosh, 2002). Sin embargo, el patrón espina de pescado podría desempeñarse mejor que otros patrones debido a que puede resistir mejor las fuerzas horizontales ocasionadas por el frenado y/o aceleración de un vehículo (Soutsos, Tang, Khalid, & Millard, 2011).

Los bloques colocados con cada uno de sus ejes paralelos en la dirección del tráfico, deben soportar las fuerzas de rotación sobre los lados. En el caso de que los bloques estén colocados en diagonal respecto a la dirección del tráfico, las fuerzas de rotación se distribuyen entre sus cuatro lados (Figura 2-19).

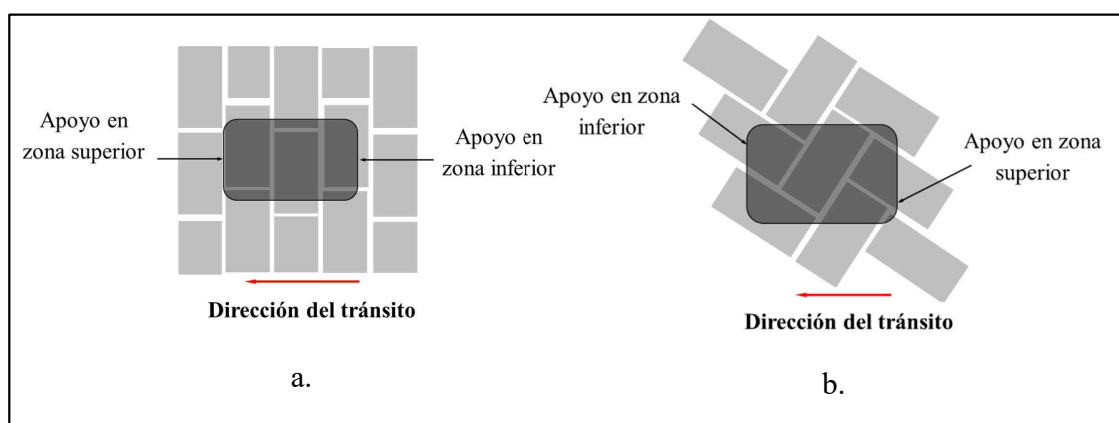


Figura 2-19. Esfuerzos en las zonas superior e inferior del bloque

a. Bloques paralelos a la dirección del tránsito b. Bloques en diagonal a la dirección del tránsito

b) Juntas entre bloques

Las variables más importantes son la separación de la junta entre bloques y la gradación de la arena utilizada en el relleno. El efecto de incrementar el ancho de la junta de 2 a 8 mm, permite una mayor rotación de los bloques y por lo tanto una reducción en el efecto de trabazón rotacional (Panda & Ghosh, 2002), (Knapton & Barber, 1982), (Dutruel & Dardare, 1984). Por lo tanto, se recomienda un ancho de junta de 2-4 mm (Dutruel & Dardare, 1984). Respecto de la granulometría o distribución de tamaños de las partículas de la arena, se observó que una granulometría con mayor cantidad de tamaños gruesos estuvo asociada a una menor

deformación estructural del pavimento debido a una resistencia al corte más alta y por lo tanto, una mayor eficiencia en el traspaso de la carga. El tamaño máximo nominal recomendado para la arena entre bloques es de 2,36 mm.

c) Trabazón de los bloques

La Figura 2-20 presenta los tres tipos de trabazón entre bloques considerados en pavimentos articulados: vertical, rotacional y horizontal (Soutsos, Tang, Khalid, & Millard, 2011).

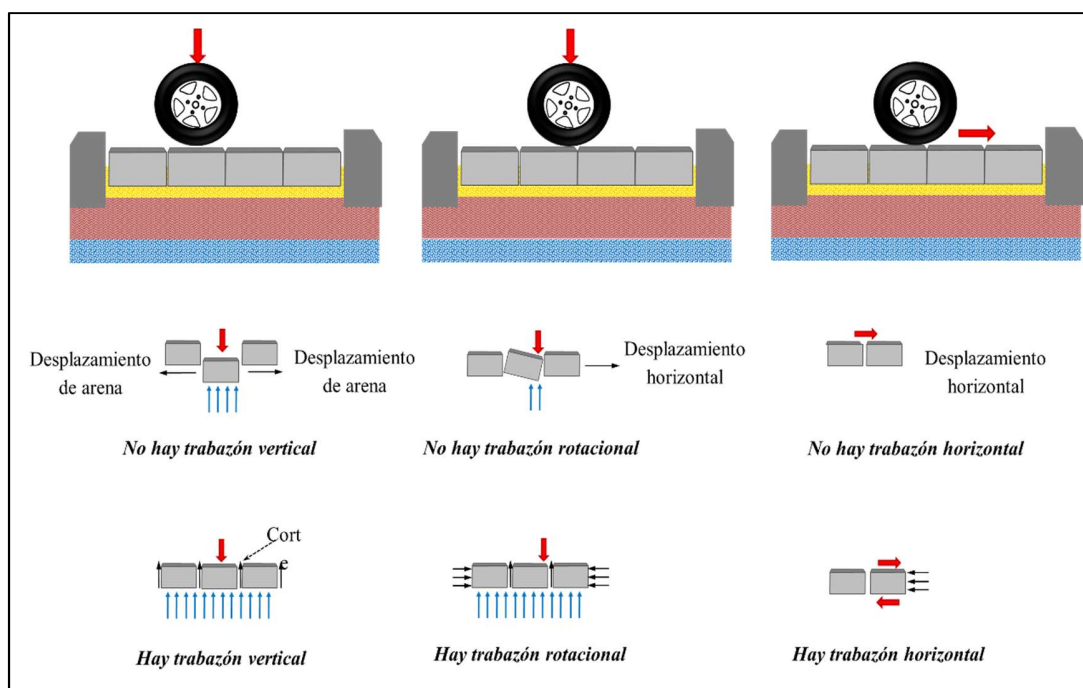


Figura 2-20. Tipos de trabazón de los bloques. Modificado de (ICPI, 2003)

i) Trabazón vertical

Los espacios entre los bloques son normalmente llenados con arena y esto se alcanza mediante la vibración de los bloques con una placa vibradora. Este procedimiento hace que la arena entre las juntas se comprima entre los bloques creando una fuerza horizontal o “dilatancia”. Esta fuerza previene que los bloques adyacentes se deslicen unos sobre otros de manera independiente y se puede expresar en términos de fuerza de fricción.

ii) Trabazón horizontal

La aceleración y frenado de los vehículos pesados pueden causar fuerzas horizontales significativas sobre los bloques. La trabazón horizontal se logra con el roce entre bloques y cama de arena y el efecto del confinamiento por grandes áreas o el uso de bordes de confinamiento propiamente tal.

iii) Trabazón rotacional

Los bloques pueden ser cargados excéntricamente causando una rotación del bloque. Dicha rotación queda controlada por el espesor del bloque, las condiciones de confinamiento y la forma del bloque (Shackel & Lim, 2003).

d) Elementos de confinamiento

El confinamiento es importante en cuatro situaciones: bordes externos, áreas que tienen diferentes patrones o materiales, zonas con pendientes mayores al 6-8% y grandes extensiones para delimitar y controlar movimientos horizontales.

Para el caso del confinamiento externo se recomienda no elevar en más de 1 cm el elemento confinado a excepción que se trate de soleras, para no disminuir el confinamiento del pavimento y garantizar el correcto drenaje del agua superficial.

2.5.3 Cama de arena

Dos aspectos se han estudiado respecto de la cama de arena: la gradación y su espesor. La cama de arena permite:

- Dar una capa de apoyo y nivelante a los bloques durante la instalación.
- Inicializar la trabazón entre los bloques.
- Facilitar el drenaje del agua que se infiltra a través de las juntas del pavimento llenas con arena.

El uso de arena de gradación gruesa mejora el desempeño del pavimento debido a que provoca una mayor resistencia al corte por movimiento vertical (Panda & Ghosh, 2002; Shackel, 1980; Knapton & O'Grady, 1983); por lo que su uso es recomendado para aplicaciones de carga pesada, tales como estaciones de bus y pavimentos para aeropuertos (BSI, 2001). En un trabajo realizado por (Panda & Ghosh, 2002) se observó que la deformación de un pavimento no se afectó con el espesor suelto de la capa de arena hasta unos 5 cm. Sin embargo, un espesor suelto de capa más allá de 5 cm incrementa significativamente la deformación del pavimento (Figura 2-21). Por esta razón, en las distintas normas de diseño y construcción se recomiendan espesores de cama de arena entre 2 a 5 cm; llegando en algunos casos a recomendar específicamente un espesor compacto de capa de arena de 3 cm (Lekso, 1981).

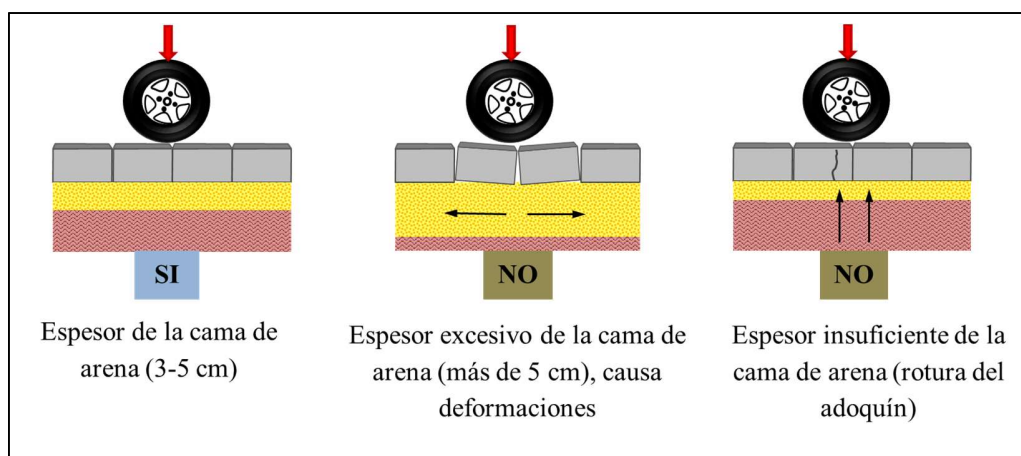


Figura 2-21. Consideraciones sobre el espesor de la cama de arena

La falla de la cama de arena puede ocurrir por la canalización de las cargas vehiculares debido principalmente a dos factores: falla estructural a través de su degradación y falla por saturación debido a un drenaje inadecuado. Se recomienda seleccionar la arena según su capacidad de soportar la degradación mecánica a largo plazo mediante el ensayo de sulfato de sodio o sulfato de magnesio (AASHTO T 104).

2.5.4 Base

Los tipos de bases empleados para un pavimento articulado son de dos clases: granular y estabilizada. La base granular está compuesta por agregados con un mínimo de trituración del 70%, un tamaño máximo absoluto de 40 mm, índice de plasticidad máximo del 4% y preferiblemente deberá tener un CBR = 100%, mientras que una base estabilizada se compone de agregados que pueden ser triturados o no y que están estabilizados con cemento o asfalto. Cuando se trata con cemento, se recomienda una resistencia a la compresión no confinada mínima de 3,5 MPa a 7 días.

2.5.5 Sub-rasante y drenaje

a) Sub-rasante

El modo de falla asumido para un pavimento de bloques es la acumulación gradual de deformación, la cual es el resultado de la deformación vertical de compresión sobre la parte superior de la sub-rasante producida por las cargas repetidas del tránsito.

b) Drenaje

La capa de bloques no es impermeable debido a la presencia de juntas rellenas con arena, por lo que el agua lluvia puede penetrar a las capas inferiores de la estructura, debilitándolas o disminuyendo su capacidad portante y posibilitando la pérdida de la arena de la cama y las juntas. Este fenómeno es más acentuado al inicio de la vida útil del pavimento pero disminuye con la rigidización de la capa de bloques debido a la presencia de partículas externas y/o detritos que se depositan en las juntas debido a la acción del tránsito. Para vías de tránsito liviano este fenómeno puede tardar meses, por lo que el pavimento debe diseñarse teniendo en cuenta que la cama de arena estará saturada durante un tiempo (Cement & Concrete Association of New Zealand and New Zealand Concrete Masonry Association Inc, 1988). Las consideraciones para los otros elementos del drenaje son las mismas que para cualquier proyecto vial.

2.6 Modelación estructural de los pavimentos articulados

La Figura 2-22 presenta distintos enfoques mediante los cuales se puede modelar el estado tensional de un pavimento articulado ante la acción de las cargas de tránsito (Koon, Zehra, & Shackel, 2000).

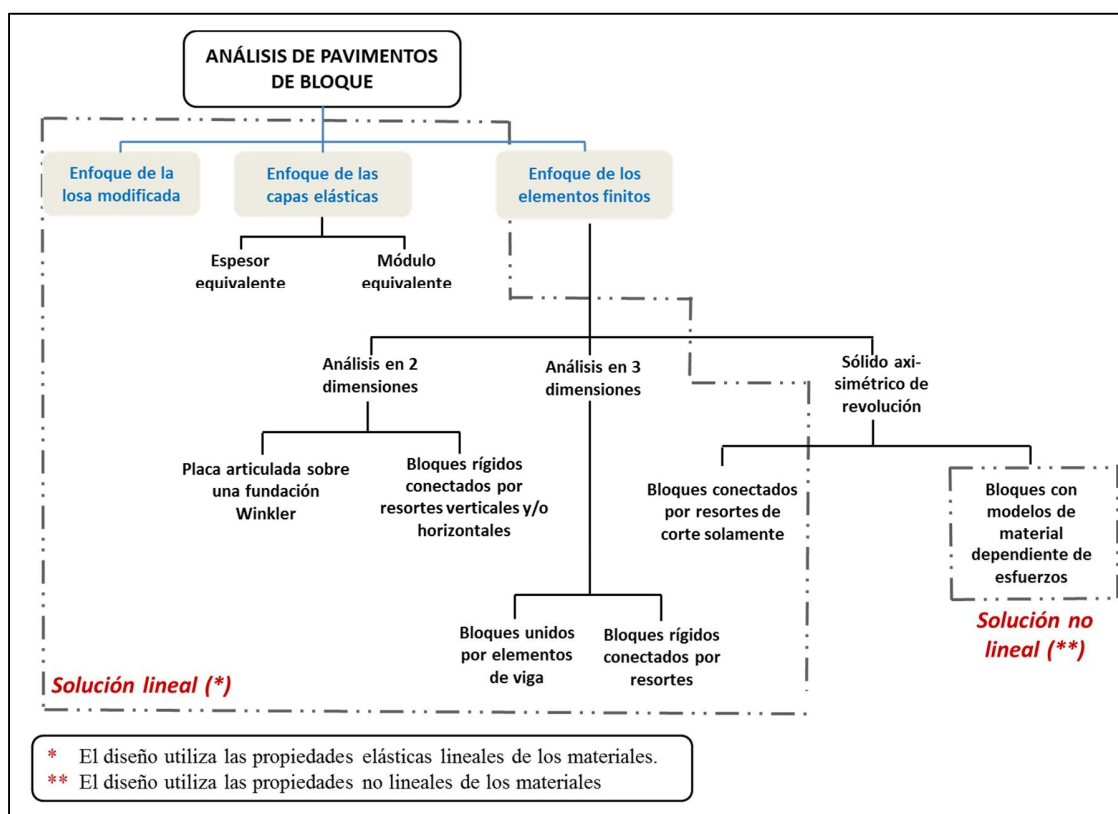


Figura 2-22. Soluciones para el comportamiento de los pavimentos de bloques bajo carga (Koon, Zehra, & Shackel, 2000)

Dos de estos enfoques son considerados analíticos: la losa modificada y el de las capas elásticas y el otro está definido como enfoque numérico, el cual corresponde al cálculo por elementos finitos.

2.6.1 Enfoque de la losa modificada

El bloque se considera como una losa con una rigidez reducida debido a la presencia de las juntas. Se asume que los bloques están unidos entre sí formando una capa que es soportada por un medio semi-infinito equivalente. La rigidez de la base o sub-base se puede obtener mediante un ensayo de placa de carga o un ensayo de deflectometría.

2.6.2 Enfoque de capas elásticas

El análisis de capas elásticas fue desarrollado para modelar pavimentos flexibles. Para aplicar este método a los pavimentos articulados, se debe encontrar una configuración de un pavimento flexible que brinde un desempeño equivalente. Existen dos métodos que cumplen con esta condición: método del espesor equivalente y el método del módulo equivalente.

En el método del espesor equivalente, se obtiene un espesor equivalente de un material para un pavimento asfáltico convencional (tradicionalmente la capa asfáltica de rodadura) que da como resultado los esfuerzos predichos bajo la capa de bloques iguales a los medidos mediante ensayos de terreno modelados mediante la teoría elástica. Trabajos previos mencionan que la capa de bloques tiene una equivalencia que oscila entre 2,1 y 2,9 veces el espesor de una capa granular y entre 1,1 y 1,5 veces el espesor de una capa asfáltica (SEPT- Small Element Pavement Technologist, 1980a).

En el método del módulo equivalente, se determina un módulo de elasticidad equivalente o efectivo para las capas de bloque y arena. Esto convierte la capa discontinua de bloques en una capa continua, permitiendo que se pueda aplicar la teoría elástica de capas.

2.6.3 Enfoque numérico

Para este tipo de enfoque, la herramienta de los elementos finitos es la manera como se estudian numéricamente los pavimentos articulados, formulando un código apropiado que permita manejar los elementos estructurales discontinuos y establecer un modelo más real del sistema de la estructura articulada. Existen tres metodologías asociadas a este tipo de enfoque: análisis en dos dimensiones, análisis en tres dimensiones y la configuración axi-simétrica.

El Anexo A presenta información con más detalle sobre las formas de modelación de los pavimentos articulados.

2.7 Diseño estructural de pavimentos articulados

Una gran parte de los investigadores de pavimentos de bloques argumentan que este tipo de pavimentos se comporta estructuralmente de manera similar a un pavimento flexible. Uno de los enfoques de modelación más utilizados para el diseño de pavimentos articulados corresponde al de “las capas elásticas”, más específicamente al del “módulo equivalente”, en el cual se determina el módulo de elasticidad equivalente para la capa que conforma el bloque y la cama de arena, convirtiendo la capa discontinua de bloques en una capa continua, permitiendo que se pueda aplicar la teoría elástica de capas. El enfoque de las capas elásticas es aplicado en este trabajo.

El diseño de un pavimento articulado requiere de algunas consideraciones originalmente destinadas al diseño de un pavimento flexible. Las más importantes son:

- La selección de los criterios de desempeño requeridos.
- La caracterización de las capas estructurales.

2.7.1 Criterios de desempeño de un pavimento articulado

Para evaluar el desempeño de un pavimento articulado, se emplean comúnmente dos criterios: las deflexiones recuperables de la superficie y las deformaciones permanentes de la superficie o ahuellamiento. Estos criterios son los mismos empleados para los pavimentos flexibles.

a) Deflexiones

Tanto para los pavimentos flexibles como rígidos se requiere que las deflexiones de la superficie sean limitadas a valores usualmente menores a 0,5 mm con el objetivo de evitar la fisuración por fatiga asociada a la carga (Shackel, 1986). Los pavimentos articulados pueden tolerar deflexiones mayores que los pavimentos convencionales. No obstante, la deflexión debe mantenerse dentro del rango “elástico” de la base que soporta el bloque de hormigón.

b) Deformación

Tanto los pavimentos asfálticos como los articulados exhiben deformaciones no recuperables o ahuellamiento bajo el tránsito. En los pavimentos articulados esta deformación ocurre desde el momento de aplicación de las cargas y antes de que se produzca el fenómeno del “lock up” o trabazón, requiriéndose controlar su magnitud para asegurar que la calidad de rodado del pavimento se mantenga en un estándar aceptable. Además, no se debe permitir que la profundidad de la huella se desarrolle hasta el punto que pueda almacenar o retener agua. Para pavimentos asfálticos convencionales, los niveles terminales de ahuellamiento generalmente oscila entre 10 mm para autopistas hasta 40 mm o más para carreteras rurales de bajo tránsito. Deben exigirse niveles similares de ahuellamiento a los pavimentos

articulados considerando el concepto de serviciabilidad. En Holanda por ejemplo, para este tipo de pavimentos, se recomienda como límite de serviciabilidad 25 mm a 35 mm (Molenaar, Moll, & Houben, 1984). Se recomienda para el diseño de un pavimento de bloques que antes de que se produzca el trabado (Lock up), no se acumulen más de 5 mm a 10 mm de deformación total para aplicaciones urbanas y no más de 15 mm a 20 mm en aplicaciones industriales o rurales (Shackel, 1986).

La Tabla 2-2 presenta las ecuaciones más empleadas para estimar la deformación admisible de un suelo de sub-rasante.

Tabla 2-2. Criterios de deformación admisible para sub-rasante

Fórmula	Citado por:
$\epsilon_{v \text{ admisible}} = \frac{2800}{N^{0.25}}$	Claessen, Edwards, Sommer, & Uge (1977)
$N = 3.0599 \times 10^{-7} \left(\frac{1}{\epsilon_{v \text{ admisible}}} \right)^{4.5337}$	Reddy & Pandey (1992)
$N = 10^{(A - 10 \times \text{Log} \epsilon_{v \text{ admisible}})}$	Theyse (1996)
$N = 6.146 \times 10^{-7} \times \epsilon_{v \text{ admisible}}^{-4}$	Edward & Valkering (1974)

Donde:

$\epsilon_{v \text{ admisible}}$ = deformación admisible por compresión sobre la sub-rasante (microstrain, en decimal)

N = número de repeticiones de deformaciones o ejes estándar

Para el caso de bloques se puede utilizar la ecuación menos conservadora porque según se explica en esta sección del documento, los límites admisibles de deformación pueden ser mayores a los de un pavimento asfáltico.

2.7.2 Caracterización de un pavimento articulado

Los elementos estructurales del pavimento son:

- La capa del bloque
- Los materiales de base y sub-base
- El suelo de sub-rasante.

La Tabla 2-3 presenta los valores típicos de las propiedades de los materiales empleados para el diseño de un pavimento articulado considerando la elasticidad de las capas.

Tabla 2-3. Propiedades de materiales para modelación de capas elásticas (Shackel, 1986)

Material	Módulo, E (MPa)		Relación de Poisson, μ	
	Rango	Recomendado	Rango	Recomendado
Bloques				
▪ Rectángulo	500-7.000	2.500	0.15-0.30	0.30
▪ Dentado	900-7.500	3.200	0.15-0.30	0.30
Base:				
▪ Granular	200-800	350	0.10-0.50	0.35
▪ Estabilizada	1.000-30.000	2.300	0.10-0.50	0.35
Sub-base:				
▪ Granular	150-450	225	0.10-0.50	0.35
▪ Estabilizada	5.000-7.000	1.500	0.10-0.50	0.35

a) Capa de bloques

Esta capa es caracterizada en términos del desempeño de una capa equivalente elástica, considerando en la mayoría de los casos que la capa de bloques es isotrópica y linealmente elástica. Ensayos de tránsito acelerado realizados en la Universidad de New South Wales indicaron que a una edad temprana del pavimento, la capa de bloques se puede caracterizar con un valor de módulo que oscila entre 2.500 MPa y 3.200 MPa aproximadamente. Estos valores se encuentran entre el rango de 500 MPa (Marais, 1984) y 7.500 MPa (British Ports Association, 1982) utilizados en los primeros análisis mecanicistas.

b) Base y Sub-base

La rigidez de los materiales no ligados depende del soporte provisto por la sub-rasante y de los esfuerzos que deben soportar. Debido a que estos esfuerzos varían punto a punto, la respuesta general de los materiales sin ligar necesita ser caracterizada como no-lineal y puede ser modelada: estimando su módulo dependiente de las condiciones de la sub-rasante y del espesor de la capa no ligada (procedimiento Shell) o dividiendo las capas del material en un número de sub-capas a las cuales el módulo es asignado sobre la base de las condiciones de esfuerzos generados por las cargas del tránsito. Se han reportado valores de módulos para materiales no ligados en un rango de 150 MPa y 700 MPa (Shackel, 1986).

c) Sub-rasante

La caracterización de los suelos de sub-rasante se realiza tradicionalmente a través de su capacidad de soporte medida con el *CBR* (California Bearing Ratio). Los métodos mecanicistas para el diseño de pavimentos requiere de la propiedad del módulo resiliente (*MR*) del suelo de fundación. La Tabla 2-4 presenta algunas

fórmulas que permiten estimar el módulo resiliente a partir del valor del CBR y viceversa. El uso de alguna de las fórmulas depende del criterio del diseñador o de la adaptación en cada país.

Tabla 2-4. Correlaciones entre CBR y módulo resiliente de suelos

Fórmula	Observación	Citado por
$MR = 10 \times CBR$	-	Shackel (1986)
$MR = 17,6 \times CBR^{0,64}$	-	Powell, Potter, Mayhew, & Nunn (1984)
$MR = 16,2 \times CBR^{0,7}$ $MR = 22,4 \times CBR^{0,5}$	Para $CBR < 5\%$ Para $CBR > 5\%$	Eka, Kameswara, & Mannan (2012)
$MR = 17,6 \times CBR^{0,64}$ $MR = 22,1 \times CBR^{0,55}$	Para $CBR < 12\%$ Para $12 \leq CBR < 80\%$	Dirección de Vialidad - Ministerio de Obras Públicas Chile (2015)

Donde:

MR = Módulo resiliente del suelo de sub-rasante (MPa)

CBR = Capacidad de soporte del suelo (%)

2.8 Estimadores de la condición estructural de un pavimento articulado

La evaluación estructural de pavimentos se puede realizar de muchas maneras. Una de ellas es la técnica del deflectómetro de impacto (FWD, de las siglas en inglés Falling Weight Deflectometer), la cual se ha establecido como una de las más eficientes y por ello ha sido aceptada ampliamente como una práctica común para la evaluación no destructiva de los pavimentos (NDT –Non-destructive testing). El ensayo consiste en la aplicación de una carga por impacto y la medición de las deflexiones ocasionadas por ésta, mediante unos geófonos con una separación específica de acuerdo con el fabricante del equipo. Estas deflexiones permiten

obtener el cuenco de deflexión o superficie del pavimento deflectada y analizar la condición estructural del pavimento. La Figura 2-23 muestra el concepto del ensayo FWD.

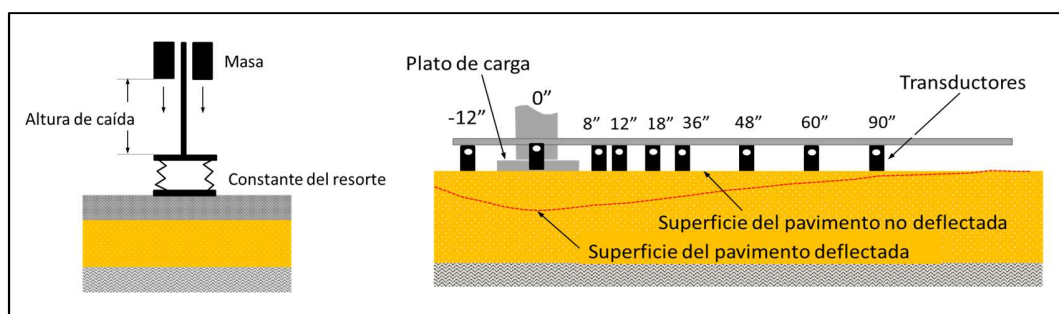


Figura 2-23. Concepto del ensayo FWD. Modificado de (Bardasano, 2014)

Cuando se emplea el enfoque de las capas elásticas para modelar estructuralmente un pavimento articulado, específicamente mediante el concepto de “módulo elástico efectivo o equivalente” se está haciendo un reconocimiento de la naturaleza no homogénea de las capas del pavimento y del daño que se acumula por acción del tráfico, sobretudo la iniciación y propagación de las fisuras. El módulo elástico efectivo obtenido del proceso de retro-cálculo representa un material unido que tiene un módulo de elasticidad similar al de un material sin presencia de daño, separado por discontinuidades o fisuras. Este es el caso de la capa de bloques de un pavimento articulado y por ello se considera válido el ensayo del FWD en un pavimento de bloques (Armitage, 1988).

Algunos parámetros del cuenco de deflexión se han propuesto para analizar y correlacionar la integridad estructural de las capas así como la respuesta estructural del pavimento según las características y condiciones de las capas que lo componen (Horak, Emery, & Maina, s.f). Estos parámetros se calculan de las deflexiones medidas en el ensayo FWD. Los principales parámetros son (Horak, Hefer, & Maina, 2015), (Schnoor & Horak, s.f):

Tabla 2-5. Parámetros del cuenco de deflexión

Parámetro	Fórmula	Indicador estructural
Deflexión máxima	D_0 como es medida	Da un indicación de todas las capas estructurales con cerca del 70% de contribución de las subrasante
Radio de curvatura (RoC)	$RoC = \frac{L^2}{2 \times D_0 \times \left[\left(\frac{D_0}{D_{200}} \right) - 1 \right]}$	Da un indicación de la condición estructural de la condición de la superficie y la base
Índice de la Capa de Base (BLI), también conocido como el Índice de Curvatura de Superficie (SCI)	$SCI = BLI = D_0 - D_{200}$	Da un indicación primeramente de la condición estructural de la capa de base
Índice de capa Intermedia (MLI), también conocido como Índice de Daño de Base (BDI)	$BDI = MLI = D_{300} - D_{600}$	Da un indicación de la sub-base y probablemente de la condición estructural de la capa seleccionada
Índice de Capas Inferiores (LLI), también conocido como Índice de Curvatura de Base (BCI)	$BCI = LLI = D_{600} - D_{900}$	Da una indicación de las capas estructurales inferiores como la capa seleccionada y las capas de subrasantes
Extensibilidad (S)	$S = \frac{[(D_0 + D_{300} + D_{600} + D_{900})/5]}{D_0}$	Supone que refleja la respuesta estructural de la estructura del pavimento completo
Área (A)	$A = \frac{150 \times (D_0 + D_{300} + D_{600} + D_{900})}{D_0}$	Lo mismo que la extensibilidad
Factores de Forma (F)	$F_1 = \frac{(D_0 - D_{600})}{D_{300}}$ $F_2 = \frac{(D_{300} - D_{900})}{D_{600}}$	Se correlacionan con el módulo de la subrasante
Pendiente de Deflexión (SD)	$SD = \frac{\tan^{-1}(D_0 - D_{600})}{600}$	-
Factor de Forma Adicional (F)	$F_3 = \frac{(D_{600} - D_{1200})}{D_{900}}$	Condición de las capas inferiores o profundidad a una capa rígida
Área bajo el Perfil del Pavimento (A_{UPP})	$A_{UPP} = \frac{(5D_0 + 2D_{300} + 2D_{600} + D_{900})}{D_0}$	Caracterización de la condición de las capas superiores del pavimento
Áreas adicionales (A)	$A_2 = \frac{150 \times (D_{300} + 2D_{450} + D_{600})}{D_0}$	Condición de las capas intermedias
	$A_3 = \frac{150 \times (D_{600} + 2D_{900} + D_{1200})}{D_0}$	Condición de las capas inferiores
Índices de Área (AI)	$AI_1 = \frac{D_0 + D_{300}}{2D_0}$	Condición de la capa superior
	$AI_2 = \frac{D_{300} + D_{600}}{2D_0}$	Condición de la capa intermedia
	$AI_3 = \frac{D_{600} + D_{900}}{2D_0}$	Condición de la capa intermedia
	$AI_4 = \frac{D_{900} + D_{1200}}{2D_0}$	Condición de la capa inferior

Para esta investigación se utilizaron los parámetros de área (A), área bajo perfil del pavimento (A_{UPP}) y el índice de área (AI_i) para analizar los cuencos de deflexión y la respuesta estructural de los tramos de pavimentos en la Etapa 4 de la evaluación deflectométrica.

2.9 Resumen del Capítulo

De la revisión de la literatura se pueden extraer los siguientes comentarios y conclusiones:

- De acuerdo con las características generales de un sistema de pavimentos de bloques, se propuso un sistema de clasificación para este tipo de estructuras según: el tipo de base, el tamaño del bloque, la forma de colocación del bloque y la aplicación objetivo del pavimento articulado.
- Se identificaron los factores considerados más importantes que influyen en el desempeño estructural de un pavimento de bloques. Estos factores son: las características del bloque, los factores constructivos como el patrón de colocación. Las juntas y el efecto de trabazón entre bloques y el confinamiento; la cama de arena, la base estructural y las condiciones de la sub-rasante y el drenaje.
- Este capítulo de la investigación presenta un resumen de los distintos enfoques para realizar la modelación estructural de un pavimento articulado con bloques de hormigón. Estos enfoques determinan la forma como se concibe el diseño estructural del pavimento. Para esta investigación se aplica el método del módulo equivalente para modelar estructuralmente un pavimento con bloques de asfalto, el cual convierte la capa discontinua de bloques en una capa continua, permitiendo que se aplique la teoría de capas elásticas.
- Existe una gran variabilidad en los valores de los módulos de elasticidad equivalentes para la capa de bloque y la cama de arena encontrados en la literatura. Diversas técnicas han sido empleadas para evaluar esta propiedad de la capa de rodadura compuesta de bloques arrojando valores muy distintos entre sí, indicando la necesidad de generar más investigaciones que persigan una homogenización de los módulos por tratarse de una variable fundamental en el diseño estructural del

pavimento. Este aspecto se considera importante debido a que los módulos de la capa de bloques que se obtienen en esta investigación pueden ser comparados con los de las capas de bloques de hormigón.

- Se requieren mayores investigaciones en terreno para construir un mejor entendimiento del comportamiento estructural de un pavimento de bloques ante la acción de las cargas del tránsito y poder utilizar las herramientas computacionales para modelar de manera más aproximada las respuestas del paquete estructural. Estos trabajos requieren de la implementación de instrumentación que permita medir los esfuerzos y/o deformaciones en distintas posiciones y profundidades de la estructura del pavimento articulado. Se destaca el análisis del efecto de trabazón o lock up que se produce en un pavimento con bloques con el paso del tránsito en el tiempo.
- Para analizar los cuencos de deflexión y la respuesta estructural de los tramos de pavimentos en la Etapa 4 de la evaluación deflectométrica de esta investigación, se proponen los parámetros de área (A), área bajo perfil del pavimento (A_{UPP}) y el índice de área (AI_I), que son indicadores de la respuesta estructural de la capa superior del pavimento; es decir, de la capa de bloques de asfalto y con adoquines que son parte del objetivo principal de esta investigación.

3 EL RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

El reciclado de pavimentos considera reutilizar tanto el material que compone la carpeta asfáltica (RAP: Reclaimed Asphalt Pavement) como las capas de base y sub-base que conforman la estructura del pavimento. La presente revisión bibliográfica se centra principalmente en la reutilización del RAP.

El RAP puede ser obtenido a través del fresado directo del pavimento o a través de los medios de demolición tradicional y luego transportado y procesado en trituradoras secundarias o terciarias y está básicamente constituido por agregado y asfalto. En general, se considera que las propiedades mineralógicas del agregado se conservan en el tiempo pero sus propiedades físicas pueden variar según la técnica que se utilice para recuperar el RAP y su método de selección. Respecto del asfalto, se asume que gran parte de las propiedades reológicas del asfalto residual se han perdido por efecto del envejecimiento y absorción de maltenos por el agregado. Dependiendo de la técnica de reciclado que se utilice, el porcentaje de material RAP que se incorpora en una nueva mezcla podría llegar al 100%.

El presente capítulo de revisión bibliográfica se divide en dos partes, las cuales a su vez se descomponen en temas considerados importantes para la presente tesis. La primera parte trata sobre los temas asociados al reciclado y propiedades del RAP en el cual se describen las ventajas y desventajas del reciclado, los tipos de reciclado, las propiedades del agregado, las propiedades del asfalto residual y los tipos de agentes de reciclado. La segunda parte se relaciona con el diseño y desempeño de mezclas con RAP en donde se exponen conceptos sobre la mezcla del asfalto residual con el asfalto virgen, los métodos de diseño de mezclas con RAP y el desempeño de las mezclas con RAP.

3.1 Temas asociados al reciclado y propiedades del RAP

3.1.1 Ventajas y desventajas del reciclado

El reciclado de pavimentos puede realizarse en sitio o en planta. Se obtiene mayor número de ventajas cuando el reciclado se realiza en sitio. No obstante, debido a que la presente tesis considera utilizar el RAP en planta se presenta a continuación una lista de las principales ventajas y desventajas del reciclado para cuando este se utiliza en planta.

a) Ventajas y desventajas económicas

- Al reutilizar los agregados que componen el RAP se requiere menor cantidad de agregados vírgenes para la producción de la mezcla, lo que representa ahorros en el costo de producción por un menor transporte involucrado en el proceso. Se estima que el uso del RAP brinda ahorros en los costos de los materiales y de construcción que fluctúan desde el 14 hasta el 34% para contenidos de RAP que varían entre el 20 y 50% (Han, Thakur, & Parsons, 2011), (Cooper, 2011).
- El asfalto residual presente en el RAP es considerado como parte del asfalto total de una nueva mezcla si ésta se elabora en caliente. En este caso, la cantidad de asfalto virgen requerido para adicionar a la mezcla es menor representando menores costos en la producción (Zaumanis & Mallick, 2013).
- Si la técnica de reciclado aplicada requiere distancias muy largas de transporte y reprocesamiento del RAP, deja de ser una alternativa económica para el proyecto convirtiéndose en su principal desventaja (Elghali, Cowell, Begg, & Clift, 2006), (Horvarth, 2003). Incrementar la distancia de transporte de 20

km a 50 km disminuye los ahorros si se considera la técnica del reciclado en caliente en planta (Miliutenko, Björklund, & Carlsson, 2013).

b) Ventajas y desventajas medio-ambientales

- El material RAP es considerado una fuente artificial de agregados pétreos, los cuales pueden ser reutilizados según la calidad que presenten. Si esto ocurre, existe una menor exigencia en la cantidad de agregados vírgenes para la producción de las mezclas por lo que se requiere una menor explotación de las canteras, conservando las fuentes naturales de agregados.
- Al requerirse menos asfalto virgen para la producción de una nueva mezcla asfáltica existe una menor necesidad de cantidad de asfalto en la planta de producción, lo cual reduce la cuantía de transporte con la consecuente disminución de los gases contaminantes que éste produce. Igual situación ocurre para los agregados pétreos requeridos para la fabricación de la nueva mezcla asfáltica (EAPA, 2014).
- Al reutilizar un material que es considerado un desecho de la construcción se disminuye la cantidad que debe ser transportada y dispuesta en botaderos, generando una disminución de los gases contaminantes producidos por los vehículos que lo transportan. Las zonas para botaderos podrán ser utilizadas con otros fines.
- Si las plantas de producción de mezclas asfálticas recicladas en caliente no poseen los filtros adecuados se pueden emitir gases contaminantes a la atmósfera debido al sobrecalentamiento del RAP.

- Según la técnica de reciclado empleada, puede existir contaminación ambiental mediante el polvo y el ruido producido durante la producción del RAP y el funcionamiento de la maquinaria.

c) Ventajas y desventajas técnicas

- Se mantiene el nivel o cota del pavimento (altura y/o gálibos) (NAPA, 2015).
- Trabajos de investigación anteriores han mostrado que mezclas asfáltica reciclada en caliente en planta con adiciones de hasta un 20% RAP presentan un desempeño igual a las mezclas producidas con un 100% de agregados vírgenes. Sin embargo, existe una incertidumbre sobre el desempeño a largo plazo de mezclas con incorporaciones superiores a dicho valor (Hajj, Sebaaly, Loria, Kass, & Liske, 2011), (Newcomb, Brown, & Epps, 2007).
- Se pueden eliminar o reducir las fisuras (NAPA, 2015).
- Se pueden corregir los problemas existentes en la gradación del agregado y/o asfalto mediante una adecuada selección de los agregados vírgenes, asfaltos y/o agentes de reciclado.

d) Ventajas y desventajas de consumo energético

- Según la técnica de reciclado empleado existe un ahorro energético por el tipo de maquinaria empleada. Algunas de estas máquinas requieren menos energía para su funcionamiento y menos transporte involucrado en el proceso de producción. Si se compara con otras técnicas de reconstrucción de pavimentos, el reciclado presenta ahorros energéticos (Bilitewski, Härdtle,

Weissbach, & Boeddicker, 1994), (Thenoux, González, & Dowling, 2007), (Chehovits & Galehouse, 2010).

- Al utilizar el RAP en una mezcla asfáltica en caliente se puede alcanzar un ahorro de energía de un 15 a 40%, representado en el ahorro energético del transporte de agregados y asfalto vírgenes así como de su explotación (Ning, Chai-Pei, & Kuan-Yu, 2011), (Lee, Chou, & Chen, 2012).
- En el caso de mezclas recicladas en caliente, altas incorporaciones de RAP obliga a un sobrecalentamiento de los agregados vírgenes; lo que conlleva el uso de mayor energía para lograrlo y mayores gases contaminantes. Esta desventaja relacionada con el consumo energético a su vez es una desventaja económica por el mayor consumo de combustible para producir más energía y una desventaja ambiental debido al posible incremento en la producción de gases contaminantes. No obstante, en un estudio realizado en España, se concluyó que mezclas asfálticas en caliente con la incorporación del 20% y 70% RAP presentaron un ahorro del 6,7% y 13,5% respectivamente en las emisiones de gases contaminantes comparadas con una mezcla asfáltica virgen con el 0% RAP incluyendo el consumo energético para su fabricación y transporte (Sampedro, Del Val, Gallego, Querol, & Del Pozo, 2012).

3.1.2 Tipos de reciclado

Tradicionalmente los tipos de reciclado se clasifican según el lugar donde se realice (in situ o en planta) y la temperatura a la cual se realice (frío o caliente). Estas formas de hacer el reciclado pueden ser combinadas entre sí. No obstante, las técnicas de fabricación de mezclas y construcción permiten ampliar esta clasificación teniendo en cuenta variables que también se pueden combinar entre sí. Se propone el esquema de clasificación que se presenta en la Figura 3-1.

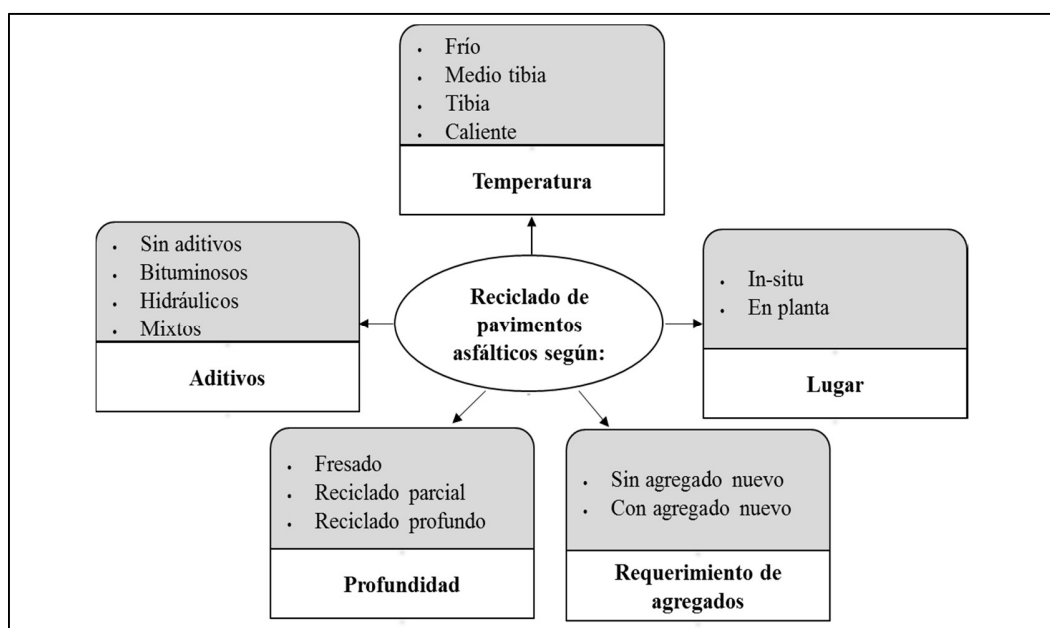


Figura 3-1: Tipos de reciclado de pavimentos asfálticos

a) Temperatura

Una mezcla asfáltica puede ser elaborada a distintas temperaturas, las cuales traen asociada la siguiente consideración: el incremento de la temperatura en la fabricación de la mezcla se relaciona directamente con un aumento tanto en la producción de gases de efecto invernadero (kg CO_2) como en el aumento del consumo de combustible requerido para secar el agregado, evaporar la humedad residual y calentar el agregado a la temperatura de mezcla. La Figura 3-2 presenta la clasificación de las mezclas asfálticas según la temperatura de fabricación.

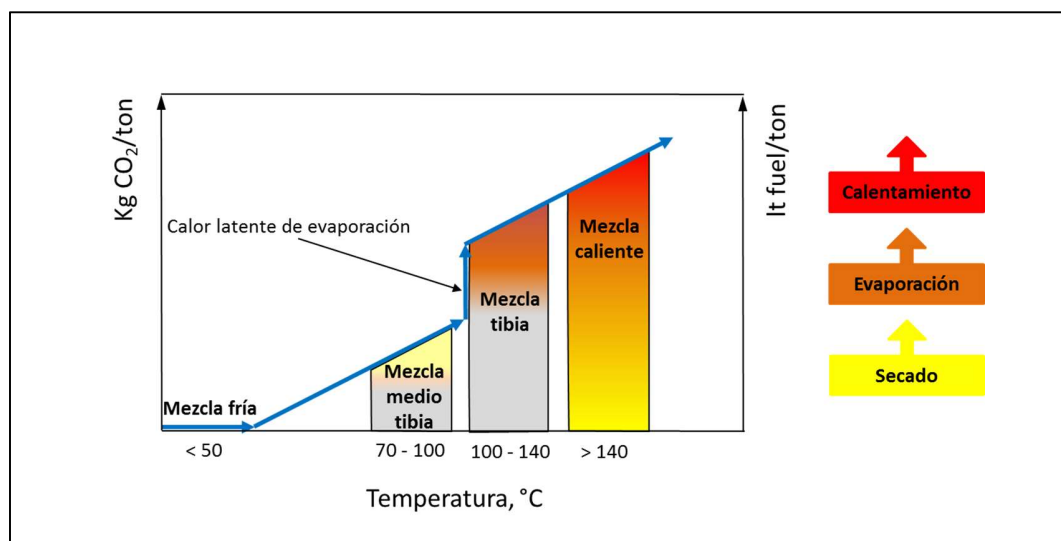


Figura 3-2: Tipos de mezclas asfálticas según la temperatura de fabricación (FHWA, 2014)

b) Lugar

De acuerdo con el lugar donde se ejecute el reciclado, éste puede clasificarse en: in situ, si se realiza en el sitio de la obra, y en planta. El reciclado en planta requiere transporte de material desde el sitio de obtención del RAP a una planta para su reprocesado y transporte al lugar de construcción. No obstante, el reciclado en planta permite re-seleccionar el material, aspecto que puede representar una ventaja si el estado del pavimento donde se obtiene el RAP es heterogéneo o se tiene RAP de varios proyectos.

c) Requerimiento de agregados

El producto final de reciclado puede requerir una corrección en la granulometría o un mejoramiento de su calidad, por lo que es necesario verificar la necesidad de adicionar agregados nuevos a la mezcla.

d) Profundidad

El espesor involucrado en la técnica de reciclado empleada diferencia la categoría del procedimiento. Si la profundidad del reciclado involucra los primeros centímetros del pavimento, se trata de un fresado; si la profundidad comprende todo el espesor de la estructura de pavimento existente, se denomina reciclado profundo y si el espesor involucrado es intermedio a las dos anteriores, el reciclado se considera parcial.

e) Aditivos

La técnica de reciclado empleada puede requerir la incorporación de un aditivo o no. Los aditivos tradicionalmente utilizados son: los bituminosos (asfalto, emulsión) y los hidráulicos (cemento, cal, cenizas volantes), los cuales pueden ser utilizados de forma conjunta o con una técnica mixta.

3.1.3 Propiedades del agregado

El agregado mineral constituye la mayor parte del RAP (93 a 97% en peso). Solo una pequeña parte corresponde al asfalto envejecido o residual (3 a 7%). Las propiedades del agregado del RAP son dependientes de las propiedades de los materiales constituyentes y del tipo de mezcla asfáltica. Podrían existir diferencias importantes entre las mezclas en cuanto a la calidad del agregado, tamaño y uniformidad. Por

ejemplo, los agregados en una capa superficial (capa de rodado) requieren cumplir exigencias mayores al agregado utilizado en capas de asfalto inferiores.

En cuanto al proceso de obtención del RAP, tanto el fresado como el triturado pueden causar un cambio de gradación de los agregados. La gradación del RAP fresado generalmente es más fino que la de los agregados vírgenes. El triturado causa menores cambios en la gradación del RAP. La distribución de los tamaños de partículas del RAP ya sea fresado o triturado puede variar según: el equipo utilizado para producir el RAP, el tipo de agregado en el pavimento y si se ha mezclado durante el proceso de remoción alguna de las capas de base o sub-base con el material asfáltico (FHWA, 2016).

El peso unitario del RAP fresado o triturado depende de los tipos de agregado en el pavimento reciclado y del contenido de humedad de la pila de material, el cual puede oscilar entre 1,9 a 2,3 gr/cm³, siendo levemente más bajo que el de los agregados naturales (FHWA, 2016).

El manejo del agregado RAP en planta requiere establecer buenas prácticas para su manejo y gestión, lo cual permitirá: el adecuado tratamiento de un material que se considera poco homogéneo, controlar el material fino y el contenido de humedad. El autor elaboró un documento tipo manual donde resume las mejores prácticas para el manejo y la gestión del RAP, el cual se incluye en el Anexo B.

3.1.4 Propiedades del asfalto residual

El contenido de asfalto residual oscila normalmente entre un 3 y un 7% en peso. El asfalto presente en el agregado RAP presenta mayor rigidez producto del envejecimiento. Durante el proceso de envejecimiento la relación de asfaltenos y maltenos cambia, por lo que se produce un incremento en la rigidez y la viscosidad del

asfalto y una disminución de la ductilidad (Al-Qadi, Elseifi, & Carpenter, 2007). Sin embargo, el incremento en el número de asfaltenos no es la única razón del envejecimiento. Los asfaltenos interactúan entre sí o con los maltenos y por lo tanto el incremento en la viscosidad depende altamente de la forma y tamaño de las partículas de los asfaltenos (Read & Whiteoak, 2003).

La mayor parte del envejecimiento del asfalto ocurre durante el mezclado con los agregados, el transporte y el proceso de extendido debido a la exposición a altas temperaturas. Este fenómeno está relacionado con el “envejecimiento a corto plazo”, el cual es causado principalmente por la oxidación durante el proceso de mezclado y colocación.

En el largo plazo, el envejecimiento del asfalto ocurre de forma más lenta principalmente asociado a un proceso que incluye:

- Oxidación por polimerización.
- Absorción de los agregados.
- Foto-oxidación (solo en los primeros micrones de la superficie).

3.1.5 Agentes rejuvenecedores para reciclado

Existe una cantidad de materiales cuyo propósito es modificar las propiedades de los asfaltos envejecidos y rejuvenecerlos; los cuales son conocidos como *agentes o aditivos de reciclado*, los cuales pueden ser: de *ablandamiento o rejuvenecedores* (Figura 3-3). Los agentes ablandadores tienen como objetivo reducir la viscosidad del asfalto envejecido y los agentes rejuvenecedores tienen como objetivo restaurar las propiedades químicas del asfalto envejecido (Roberts, Kandhal, Brown, Lee, & Kennedy, 1996). La Figura 3-3 presenta distintos materiales que son utilizados como agentes o aditivos.

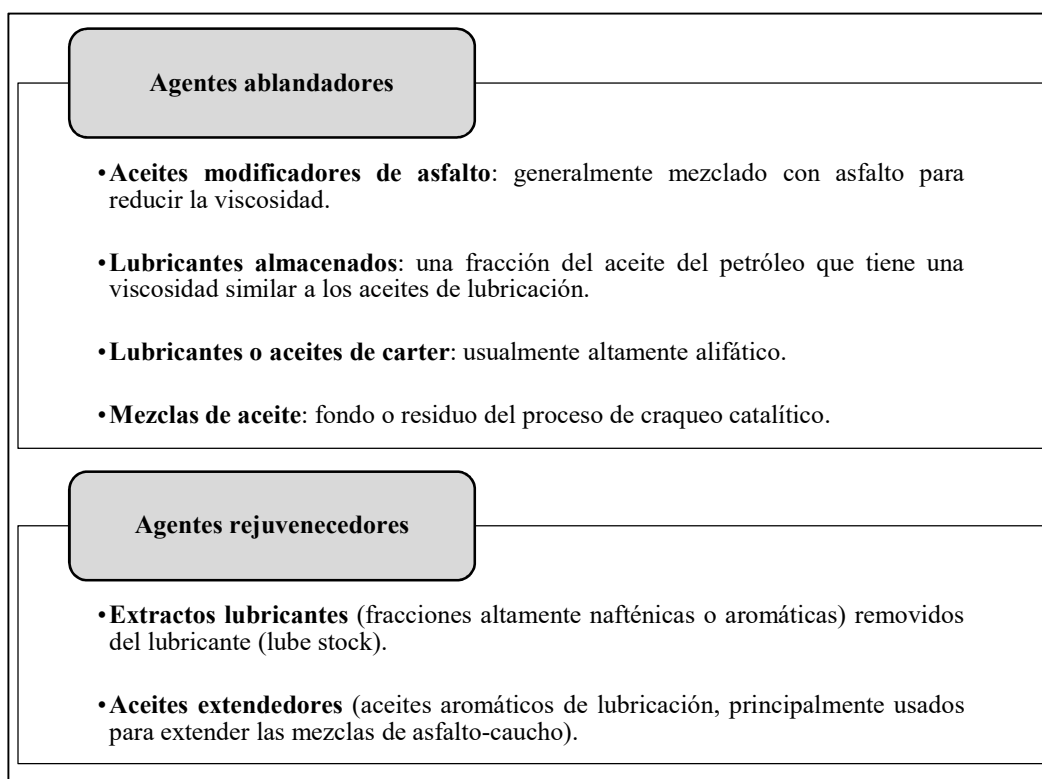


Figura 3-3: Agentes o aditivos ablandadores y rejuvenecedores del asfalto.

Modificado de (Zaumanis & Mallick, 2015)

Los agentes ablandadores interactúan con el asfalto envejecido del RAP mediante un proceso de difusión. El tiempo de difusión está influenciado por el peso molecular y la viscosidad (principalmente por la viscosidad de la fase maltenos) (Zaumanis & Mallick, 2013), (Karlsson, Isacson, & Ekblad, 2007). El proceso de difusión de los agentes o aditivos dentro de la capa de asfalto residual ocurre en cuatro pasos (Carpenter & Wolosick, 1980), (Austroads, 2013):

- El agente forma una capa de viscosidad muy baja que rodea el agregado, el cual está cubierto con una capa de asfalto envejecido de viscosidad alta.

- El agente comienza a penetrar dentro del asfalto envejecido disminuyendo la cantidad de agente adicionado, ablandando el asfalto envejecido y cubriendo las partículas de agregado del RAP.
- La penetración continúa y la viscosidad de la capa más interna se reduce y gradualmente se incrementa la viscosidad de la capa más externa.
- Finalmente, en el tiempo se alcanza un equilibrio en la mayor parte de la capa de asfalto.

La acción de los agentes rejuvenecedores se puede explicar utilizando la composición determinada por Corbett (Huang & Bertholf, 1997), como la restauración de los componentes polares de los maltenos. La explicación del cambio químico que experimenta el asfalto escapa al alcance de esta tesis.

También se utilizan como agentes de reciclado del asfalto: las emulsiones asfálticas y los asfaltos cortados. Estos últimos ya en desuso por requerimientos ambientales.

3.2 Diseño y desempeño de mezclas con RAP

3.2.1 Mezcla del asfalto residual con el asfalto virgen

En los métodos de diseño para mezclas asfálticas que contienen RAP, frecuentemente se asume que el asfalto residual presente en el RAP se mezcla con el asfalto nuevo o el rejuvenecedor creando una mezcla nueva con propiedades de los asfaltos combinados (Al-Qadi, Elseifi, & Carpenter, 2007). La teoría es que durante el proceso de calentamiento en la planta, el asfalto residual presente en el RAP se torna líquido y se mezcla con el asfalto virgen adicionado en el proceso, lo que significa que la cantidad de asfalto nuevo a adicionar se puede reducir para el porcentaje especificado,

una cantidad igual al contenido de asfalto residual presente en el RAP. El grado en el cual se mezclan los asfaltos ocurre durante la producción y sigue siendo objeto de debate científico. Algunos estudios han encontrado que la mezcla de los asfaltos residual y virgen ocurre en un grado significativo (McDaniel, Soleymani, Anderson, Turner, & Peterson, 2000), (Al-Qadi I. , y otros, 2009), (Chen, Chu, & Lin, 2007).

Otras investigaciones indican que el mezclado de ambos asfaltos da como resultado un doble recubrimiento: uno del asfalto envejecido y uno del nuevo (Mollenhauer & Gaspar, 2012), (Huang, Li, Vukosavljevic, Shu, & Egan, 2005). Este fenómeno se conoce como la “Roca negra” (Black Rock). El agregado del RAP cubierto con el asfalto envejecido, funciona como un agregado sólido cuando se adiciona a la mezcla y en vez de mezclarse el asfalto nuevo con el residual envejecido, éste último forma una capa dura que cubre las partículas del RAP (Figura 3-4:). Si el escenario de la roca negra fuera cierto, limitaría el ahorro de los costos que se podrían alcanzar a través del uso del RAP ya que la cantidad de asfalto nuevo a adicionar a la mezcla no se podría disminuir.

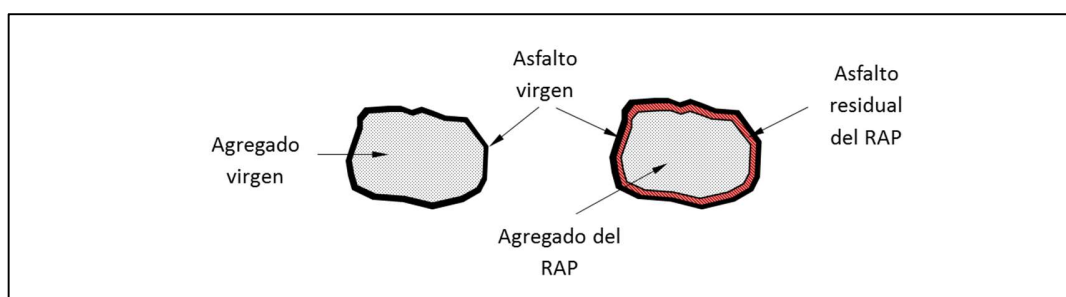


Figura 3-4: Sistema de capas compuestas en mezclas asfálticas con RAP (Huang, Li, Vukosavljevic, Shu, & Egan, 2005)

La Figura 3-5 presenta un esquema de la regla “Log pen”, la cual es válida solamente para mezclas en caliente asumiendo que el asfalto envejecido y el nuevo llegan a ser

un sistema de una fase. Si el RAP es reutilizado frío, aplica el principio de roca negra por lo que dará como resultado un sistema de dos fases.

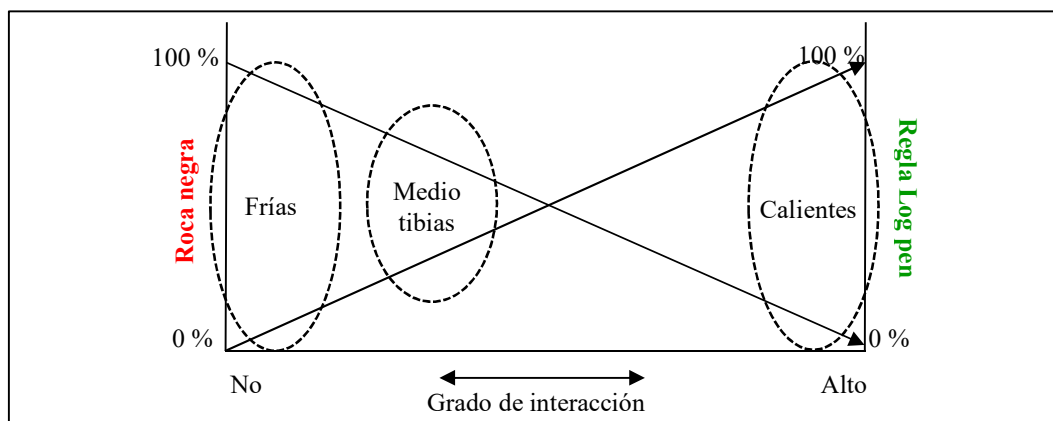


Figura 3-5: Interacción entre el asfalto envejecido del RAP y el asfalto nuevo (Van De Ven, Jenkins, Voskuilen, & Van Den Beemt, 2007)

Los factores que facilitan una interacción entre los asfaltos nuevos y envejecidos en las mezclas asfálticas son: el mezclado mecánico, compactabilidad y la difusión (Karlsson & Isacson, 2003). La efectividad en el mezclado mecánico está influenciada por otros factores: temperatura, viscosidad del asfalto, tiempo de mezcla y el tipo de mezcla. La compatibilidad entre los asfaltos es un requerimiento para crear un asfalto homogéneo y es dependiente de la naturaleza y distribución de las asociaciones intermoleculares, las cuales a su vez determinan su estabilidad estructural. La difusión está en función de: la temperatura, las fuerzas intermoleculares, la rigidez estructural de las moléculas difundidas (restricciones sobre la flexión y torsión), estructura microscópica de la fase estacionaria si existe, tamaño y forma de las moléculas difundidas o aglomeraciones y de la viscosidad del medio en el cual toma lugar la difusión.

3.2.2 Máximo porcentaje de RAP a utilizar

Uno de los desafíos de adicionar RAP a una mezcla asfáltica en planta es la dificultad para secar y/o calentar el RAP. Incorporar un alto contenido de RAP generalmente disminuye la producción de la planta debido a la humedad y la presencia del asfalto residual del RAP. Investigaciones anteriores determinaron las temperaturas de sobrecalentamiento para el secado/calentamiento del RAP según: contenido de RAP, contenido de humedad en el RAP y temperatura de descarga requerida de la mezcla asfáltica (National Technology Development, 2009).

- a) Efecto del contenido de RAP sobre la temperatura de sobrecalentamiento de los agregados vírgenes

La Figura 3-6 muestra la relación que existe entre el contenido de RAP y el incremento de la temperatura de sobrecalentamiento de los agregados vírgenes. La tendencia de la relación implica que a medida que se incremente el contenido de RAP la temperatura de sobrecalentamiento de los agregados vírgenes aumenta respecto a la temperatura normal de fabricación de una mezcla asfáltica (160 °C a 180 °C).

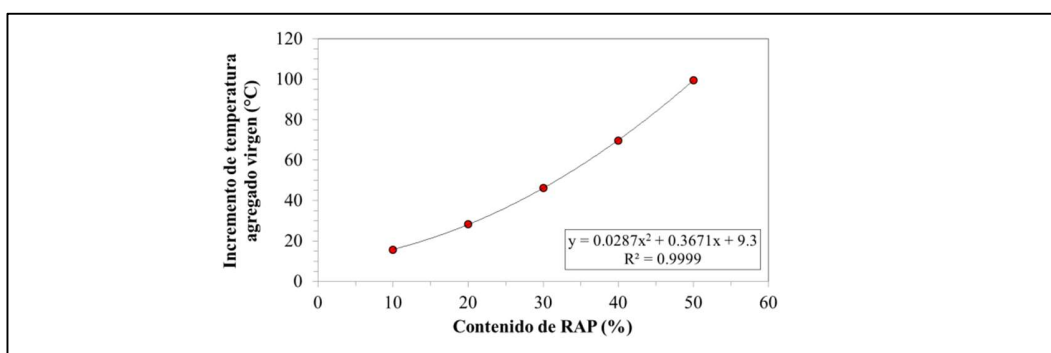


Figura 3-6: Incremento de la temperatura de los agregados vírgenes según contenido de RAP en la mezcla. Modificado de (National Technology Development, 2009)

b) Efecto del contenido de RAP y de humedad en el RAP

Para una correcta planificación de los trabajos en la planta debe controlarse la humedad presente en los agregados del RAP, especialmente en la zona de acopio, debido a que se requiere de energía para evaporarla. La Figura 3-7 muestra la relación entre el contenido de RAP y el incremento de la temperatura para sobrecalentar los agregados vírgenes para un incremento de un 1% de humedad con una temperatura de descarga de referencia de 116 °C.

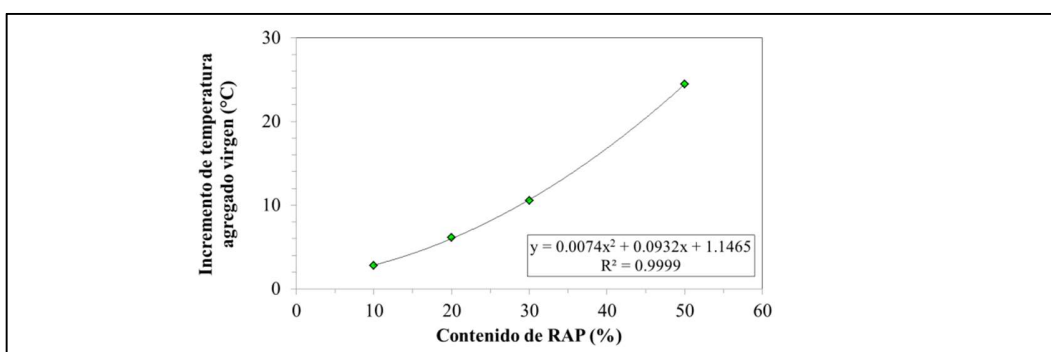


Figura 3-7: Incremento de la temperatura de los agregados vírgenes según contenido de RAP y su humedad en la mezcla. Modificado de (National Technology Development, 2009)

Se observa que a medida que se incrementa el contenido de RAP en la mezcla, aumentar un 1% de humedad requiere un mayor incremento de temperatura para sobrecalentar los agregados vírgenes y así evaporar la humedad presente en el RAP.

La Figura 3-8 presenta la tendencia de incremento de la temperatura de sobrecalentamiento del agregado virgen a medida que aumenta la humedad presente en el RAP para una temperatura de descarga de 149 °C.

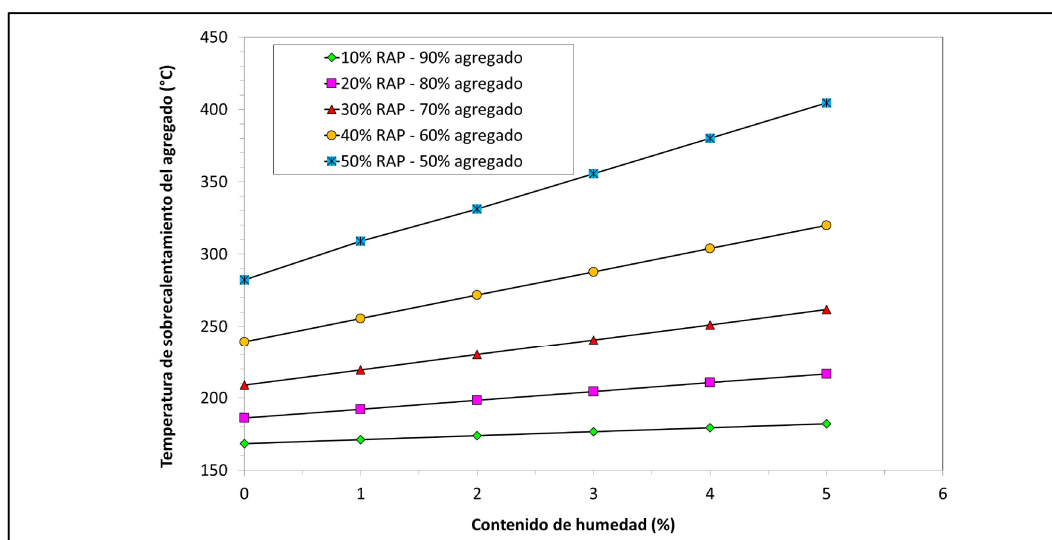


Figura 3-8: Temperaturas para calentar los agregados vírgenes para una temperatura de descarga de la mezcla de 149 °C. Modificado de (National Technology Development, 2009)

c) Efecto del contenido de RAP en la temperatura de descarga

Las condiciones de temperatura de descarga de una mezcla asfáltica pueden variar según el proyecto. Variables como el clima (temperatura ambiente, condiciones de lluvia, niebla, vientos), localización de la obra (altitud), las propiedades de la mezcla asfáltica (viscosidad del asfalto) y las situaciones propias del proyecto (maquinaria, personal, herramientas, planificación) pueden afectar la temperatura de descarga de una mezcla asfáltica. Con el incremento de la temperatura de descarga de la mezcla hay que aumentar la temperatura de los agregados vírgenes ya que se requiere de mayor energía para secar/calentar el RAP. La Figura 3-9 presenta la relación entre el contenido de RAP y el incremento de la temperatura de los agregados para 11 °C de incremento en la temperatura de descarga.

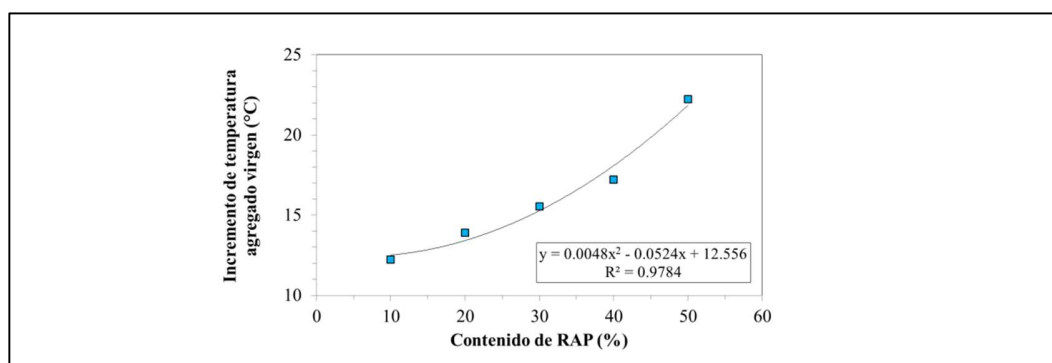


Figura 3-9: Efecto del contenido de RAP en la temperatura de descarga de la mezcla.
Modificado de (National Technology Development, 2009)

La Tabla 3-1 presenta los efectos del contenido de RAP, el contenido de humedad presente en el RAP y la temperatura de descarga de la combinación de agregados vírgenes y del RAP. Los valores corresponden al análisis para una mezcla asfáltica con el 0% de humedad y una temperatura de descarga de referencia de 116 °C.

Tabla 3-1: Efectos del contenido de RAP, contenido de humedad y temperatura de descarga sobre la temperatura de sobrecalentamiento de los agregados vírgenes
(National Technology Development, 2009)

Contenido de RAP adicionado (%)	Incremento de la temperatura del agregado, °C		
	Para el mismo contenido de humedad y temperatura de descarga	Por cada 1% de incremento de humedad en el RAP	Por cada 11 °C de incremento en la temperatura de descarga
10	15.7	2.8	12.2
20	28.4	6.1	13.9
30	46.2	10.6	15.6
40	69.6	N/A	17.2
50	99.6	24.4	22.2

3.2.3 Método de diseño de mezclas con RAP

Una mezcla asfáltica reciclada con incorporación de RAP se puede diseñar aplicando dos metodologías: el Marshall modificado propuesto por el Instituto del Asfalto Norteamericano y el Superpave como parte del Programa Estratégico de Investigación en carreteras (SHRP, Strategic Highway Research Program) establecido por el Congreso de los Estados Unidos. Ambos métodos suponen una mezcla total entre el asfalto residual y el asfalto virgen adicionado a la nueva mezcla. El presente trabajo está basado en la metodología propuesta por el Instituto del Asfalto ya que emplea el procedimiento de diseño Marshall. Se consideró conveniente emplear este método porque es el que actualmente se utiliza en Chile y permite comparar los resultados obtenidos con los de las mezclas tradicionalmente diseñadas en el país. El Instituto del Asfalto recomienda seguir los siguientes pasos para realizar el diseño de una mezcla asfáltica en caliente con RAP:

- Gradación del agregado, contenido de asfalto y viscosidad del asfalto reciclado (residual) del RAP.
- Gradación del nuevo agregado y/o del agregado del material recuperado (RAM).
- Cálculo del agregado combinado de la mezcla reciclada.
- Cálculo de la demanda de asfalto aproximado de los agregados combinados.
- Estimación del porcentaje de asfalto nuevo en la mezcla (en algunos casos un agente de reciclado se puede incorporar).
- Selección del grado del nuevo asfalto.
- Diseños de mezclas de prueba por el método Marshall o Superpave.
- Selección de la fórmula de trabajo.

La Tabla 3-2 presenta las fórmulas propuestas por el Instituto del Asfalto para realizar el diseño de una mezcla asfáltica reciclada en caliente y que fueron utilizadas en la presente investigación.

Tabla 3-2: Formulas básicas para el diseño de una mezcla asfáltica con RAP

	Para contenido de asfalto	
	Por peso del total de la mezcla	Por peso del agregado
% asfalto nuevo (P_{nb})	$\frac{(100^2 - rP_{sb})P_b}{100(100 - P_{sb})} - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100 - P_{sb}}$	$P_b - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100}$
% RAP (P_{sm})	$\frac{100(100 - r)}{100 - P_{sb}} - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100 - P_{sb}}$	$\frac{(100 + P_{sb})(100 - r)}{100}$
% agregado nuevo y/o RAM (P_{ns})	$r - \frac{rP_b}{100}$	r
Total	100	$100 + P_b$
% asfalto nuevo del total del contenido de asfalto (R)	$\frac{100P_{bn}}{P_b}$	$\frac{100P_{nb}}{P_b}$

Donde:

r : Porcentaje de agregado nuevo y/o reciclado del total de los agregados de la mezcla reciclada

P_{sb} : Contenido de asfalto de la mezcla recuperada (RAP)

P_{nb} : Porcentaje de asfalto nuevo en la mezcla reciclada

P_b : Contenido de asfalto aproximado de la mezcla reciclada

P_{sm} : Porcentaje de la mezcla recuperada en la mezcla reciclada

P_{ns} : Porcentaje adicional de agregado (nuevo o reciclado)

R : Porcentaje de asfalto nuevo y/o agente rejuvenecedor del total del asfalto en la mezcla reciclada

Un método rápido para establecer el contenido de asfalto inicial para continuar con el diseño Marshall se propone en la ecuación 3.1 como sigue:

$$P = (0,035 \times a) + (0,045 \times b) + (K \times c) + F \quad (3.1)$$

Donde:

P: Contenido aproximado de asfalto en la mezcla. Porcentaje en peso de la mezcla total.

a: Porcentaje de agregado mineral retenido en el tamiz 2,36 mm (expresado como número entero).

b: Porcentaje de agregado mineral pasante del tamiz 2,36 mm y retenido en el tamiz N° 200 (75 µm) (expresado como número entero).

c: Porcentaje de agregado mineral pasante del tamiz N° 200 (75 µm).

K: Factor que depende del porcentaje de material pasante del tamiz N° 200 (75 µm).

F: Factor que oscila entre 0–2%, basado en la absorción de los agregados pesados o livianos. En ausencia de algún dato se sugiere utilizar $F=0,7$.

Tabla 3-3. Factor "K" para el diseño de mezclas asfálticas con RAP

% pasa N° 200	<i>K</i>
11 – 15	0,15
6 – 10	0,18
Menos del 5	0,20

3.2.4 Desempeño de las mezclas con RAP

Las mezclas asfálticas elaboradas con altos contenidos de RAP (> 25% según la FHWA –Federal Highway Administration) presentan cuestionamientos relacionados con su desempeño en terreno, el cual debe ser igual o mejor que el de una mezcla asfáltica sin RAP. La Tabla 3-4 presenta algunos de estos cuestionamientos.

Tabla 3-4: Cuestionamientos sobre el desempeño de mezclas asfálticas con RAP.
(adaptado de Austroads, 2015).

Cuestionamiento	Comentario
¿La inclusión de RAP hace las mezclas más rígidas y frágiles?	El asfalto puede ser más rígido pero no necesariamente significa que la mezcla sea menos resistente a la fatiga. Todo depende de la cantidad de asfalto residual del RAP, su rigidez y si se mantiene el mismo asfalto virgen o se cambia a un grado más suave o si se usa un agente rejuvenecedor
¿La inclusión de RAP afecta negativamente el desempeño a fatiga de superficies delgadas?	
¿La inclusión de RAP afecta la resistencia al deslizamiento de superficies con mezclas nuevas?	El efecto es insignificante a bajos contenidos de RAP y es dependiente de la calidad de los agregados del RAP
¿La inclusión de RAP afecta la durabilidad de la mezcla?	Puede ser perjudicial o beneficioso dependiendo de la cantidad de asfalto residual del RAP y su rigidez y si se toman medidas para corregir las propiedades del asfalto presente en la mezcla

Esta parte de la investigación presenta una revisión bibliográfica sobre los efectos que produce la inclusión de RAP sobre el desempeño de una mezcla asfáltica, analizados en tres categorías: estructural, funcional y ambiental, y las principales patologías asociadas como se presenta en la Figura 3-10.

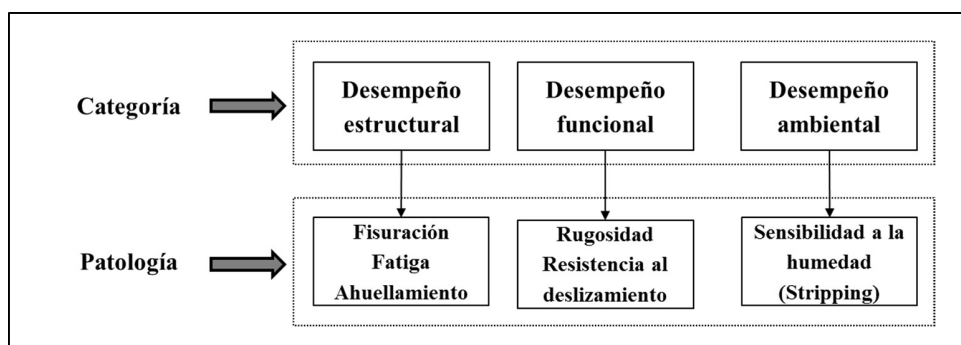


Figura 3-10: Categorías para el desempeño de una mezclas asfáltica con RAP

a) Desempeño estructural de mezclas asfálticas

Las propiedades más importantes desde el punto de vista estructural de una mezcla asfáltica son: el módulo dinámico, su resistencia a la tracción y fatiga y su resistencia al ahuellamiento o deformación permanente.

i) Módulo dinámico

- Entre más envejecido se encuentre el asfalto residual presente en el RAP dará como resultado un incremento en el módulo de la mezcla, por lo que un mayor contenido de RAP se asocia a una mezcla más rígida (McDaniel & Shah, Use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Under Superpave Specifications, 2003).
- El estudio NCHRP 9-46 evaluó el uso de mezclas con el 55% RAP y determinó que las rigideces medidas con el módulo dinámico a distintas temperaturas y frecuencias se incrementaron entre un 25% a 60% comparado con las mezclas patrón.

- Otro estudio sobre mezclas asfálticas con RAP producidas en planta (0, 15, 25 y 40%) encontró que un incremento en el contenido de RAP generalmente causa un aumento en el módulo dinámico de las mezclas (McDaniel, Shah, Huber, & Copeland, 2013). Para mezclas que emplearon asfaltos más blandos se encontró que los módulos dinámicos fueron más bajos comparados con las mezclas elaboradas con asfalto nuevo, por lo que el incremento de la rigidez provocada por la adición de RAP puede ser compensada por el uso de un asfalto más blando.
- Mezclas producidas en planta con un 40% RAP mostraron que sus rigideces se incrementaron hasta un máximo de 49% comparadas con la rigidez de la mezcla patrón sin RAP (Mogawer, Austerman, & Roussel, 2011).

ii) Fisuración y fatiga

El asfalto residual envejecido presente en el RAP ocasiona un incremento en la rigidez de la mezcla, aumentando la posibilidad de daño por fatiga y fisuración por baja temperatura. Distintos estudios se han desarrollado para entender este efecto:

- Un estudio de desempeño de pavimentos a largo plazo (LTTP - Long-Term Pavement Performance) para un recapado (con período de diseño de 20 años y 30% RAP), mostró que la fatiga, la fisuración longitudinal y transversal son las patologías más comunes que ocurrieron en una mezcla con RAP (West, Michael, Turochy, & Maghsoodloo, 2011).
- En unas secciones de LTTP en New Jersey se determinó para pavimentos que tenían mezclas sin y con RAP que el fisuramiento comenzó al mismo tiempo. Sin embargo, para mezclas con un 30% RAP hubo un progreso

más rápido de dicha fisuración. No obstante lo anterior, el estudio concluyó que las mezclas que contenía RAP se desempeñaron igual o mejor que las mezclas patrón para la mayoría de los casos (Bennert & Maher, 2013).

- Un estudio mostró que con bajos contenidos de RAP en la mezcla ($< 10\%$), sus propiedades no difieren de aquellas que presenta una mezcla sin RAP. Sin embargo, a altos contenidos de RAP ($> 25\%$), los ensayos de tracción indirecta y de fatiga en viga de cuatro puntos muestran un incremento de la rigidez, la cual ocasionará la fisuración de la mezcla si no se le hacen ajustes previos (McDaniel, Soleymani, Anderson, Turner, & Peterson, 2000).
- Cuando el contenido de RAP en la mezcla es alto ($> 25\%$), establecer la hipótesis de que el incremento de la rigidez es lineal con el aumento del contenido de RAP puede ser erróneo o inexacto. En estos casos, tanto la rigidez de la mezcla como la magnitud de la fisuración dependerá de manera importante del grado de mezcla entre los asfaltos nuevo y residual del RAP (Bennet & Dongre, 2010).
- Otro estudio también investigó mezclas producidas en planta con un 40% RAP, las cuales no mostraron un efecto significativo sobre la propiedad de fisuración térmica. Aunque la temperatura de fisuración para bajas temperaturas se incrementó hasta 6°C comparado con la mezcla patrón, ésta no cambió si se compara con las mezclas con un 15% RAP (Shah, McDaniel, Huber, & Gallivan, 1998).
- El estudio NCHRP 9-46 concluyó que la energía de fractura, la cual es un indicador del potencial de fisuración por fatiga, fue mayor para las mezclas patrón comparadas con las mezclas con altos contenidos de RAP. En

cuanto al análisis de fisuración por baja temperatura, se empleó un BBM (Bending Beam Rheometer) ensayando vigas de mezclas, las cuales indicaron que las mezclas con altos contenidos de RAP se desempeñaron de manera similar a las mezclas patrón (West, Willis, & Marasteanu, 2013).

- Al contrario de lo comúnmente reportado en diferentes trabajos realizados por (Al-Qadi, Aurangzeb, Carpenter, Pine, & Trepanier, 2012), (McDaniel, Shah, & Huber, 2012) se obtuvo un incremento en la resistencia a la fatiga para las mezclas asfálticas que contenían un 40% RAP y más comparadas con las mezclas patrón. Para desarrollar estos trabajos se utilizaron los procedimientos de viga de fatiga y de daño continuo visco-elástico simplificado (S-VECD). Se reportaron resultados similares por (Shu, Huang, & Vukosavljevic, 2008).
- En el NCAT (National Center for Asphalt Technology) se realizaron investigaciones donde se desarrolló una relación entre los resultados de los ensayos ejecutados en laboratorio y pruebas de terreno en pistas de prueba. Estos resultados sugieren que existe un mejor comportamiento al desempeño por fatiga para las mezclas asfálticas con un 50% RAP en comparación con las mezclas patrón. También se indica que el incremento en la rigidez de las mezclas con altos contenidos de RAP puede reducir las deformaciones críticas por tracción en la estructura del pavimento, lo cual podría ser beneficioso para su diseño estructural (West, Willis, & Marasteanu, 2013), (West, y otros, 2012).
- Resultados obtenidos para un estudio de mezclas asfálticas abiertas (open-graded) con 45% RAP mostró que su desempeño en términos de fisuración fue igual o mejor comparado con mezclas con un 15% RAP (West, y otros, 2012).

- Otros trabajos reportaron que la inclusión de RAP dio como resultado una disminución en la tendencia del desempeño a la fatiga de las mezclas medido mediante el ensayo de viga de cuatro puntos para mezclas que contenían 0, 20, 40 y 60% RAP (Mohammad, y otros, 2003).
- Específicamente para mezclas del tipo SMA (Stone Mix Asphalt) con RAP, se reportó que hasta un contenido de incorporación del 20% RAP no afectó negativamente el desempeño por fatiga (Watson, Vargas-Nordbeck, Moore, Jared, & Wu, 2008).
- Se investigaron dos métodos para mejorar la durabilidad y la resistencia a la fatiga de mezclas con RAP (Willis, Turner, Padula, Tran, & Julian, 2013). El primer método consistió en incrementar la cantidad de asfalto virgen (por ejemplo: emplear un contenido de asfalto ligeramente más alto que el determinado para el diseño de la mezcla en un 0.25% y 0.50%) y el segundo método correspondió a disminuir el grado del asfalto virgen, por ejemplo: emplear un asfalto con un grado más blando. Se fabricaron una serie de mezclas variando el contenido de RAP de 0%, 25% y 50% utilizando un asfalto virgen estándar clasificado como PG 67 -22. Estas mezclas se ensayaron para evaluar distintas propiedades como: la resistencia a la fisuración, la reflexión de fisuras y el ahuellamiento. Los resultados mostraron que para mejorar la resistencia a la fisuración, la cantidad de asfalto virgen debería incrementarse un 0.1% por cada 10% RAP en la mezcla y hasta un 30%; es decir, hasta un máximo de 0.3% más alto que el contenido de asfalto de diseño. Una vez el RAP excede el 30%, se debe emplear un asfalto más blando para incrementar la resistencia a la fisuración. Sin embargo, se reportó que algunas mezclas fallaron por el criterio de ahuellamiento por lo que se sugirió un seguimiento conjunto de la resistencia a la fisuración y el ahuellamiento.

iii) Ahuellamiento

El envejecimiento del asfalto residual presente en el agregado RAP hace que se incremente la rigidez de las mezclas y por lo tanto su resistencia a la deformación plástica (Huang, Zhang, Kingery, & Zuo, 2004), (McDaniel & Shah, 2003). Sin embargo, se debe poner atención cuando se emplean rejuvenecedores o asfaltos con grados reducidos (Zaumanis & Mallick, 2015). Algunas investigaciones han mostrado que tanto los rejuvenecedores como los asfaltos vírgenes continúan penetrando en el asfalto residual del RAP aún después de que el pavimento ha sido extendido debido al proceso de difusión (Carpenter & Wolosick, 1980), (Noureldin & Wood, 1987). El efecto dominante de la capa más exterior podría permitir el incremento de las deformaciones permanentes a edades tempranas de la vida del pavimento hasta que se alcanza el equilibrio (Potter & Mercer, 1997), (Shah A. , McDaniel, Huber, & Gallivan, 1998), (Mogawer, y otros, 2012). Algunas investigaciones han mostrado un buen desempeño al ahuellamiento aun cuando se haya utilizado un asfalto con un grado más suave o un rejuvenecedor (Tran, Taylor, & Willis, 2012), (Mogawer, y otros, 2012). (Gardiner & Wagner, 1999) encontraron que la incorporación de RAP en la mezcla disminuyó el potencial de ahuellamiento y susceptibilidad a la temperatura e incrementó el potencial de fisuración a baja temperatura. Contrario a la mayoría de los estudios, (Widyatmoko, 2008) determinó que las mezclas que contenían RAP mostraron una resistencia más baja a las deformaciones permanentes comparadas con sus equivalentes sin RAP. Este comportamiento fue explicado debido a que con un incremento del RAP se requiere adicionar mayor cantidad de agentes rejuvenecedores o asfaltos blandos dando como resultado una mezcla blanda y susceptible al ahuellamiento. Por otro lado, para mezclas del tipo SMA se reportó que contenidos de RAP de hasta un 20% no afectó significativamente la resistencia al ahuellamiento. Esto se debe a que la resistencia al ahuellamiento de mezclas SMA comparada con otras mezclas, está más relacionada con la

trabazón que proporciona el agregado grueso que con la viscosidad del asfalto (Watson, Vargas-Nordbeck, Moore, Jared, & Wu, 2008).

b) Desempeño funcional de mezclas asfálticas

El desempeño funcional está relacionado principalmente con las capas superficiales. Los indicadores usualmente analizados en este aspecto son la rugosidad y la resistencia al deslizamiento.

i) Rugosidad

La rugosidad afecta no solamente la calidad de rodado experimentada por el usuario sino también los costos por consumo de combustible y el mantenimiento del vehículo. Un análisis estadístico comparativo a corto y largo plazo sobre el desempeño de la rugosidad de re-capados asfálticos con y sin RAP encontró que su desempeño fue equivalente en la mayoría de los casos (FHWA, 2011).

ii) Resistencia al deslizamiento

La principal razón para remover la superficie del pavimento es una menor resistencia al deslizamiento. Esto plantea el interrogante sobre si la re-utilización de este material RAP podría afectar la nueva calidad de la superficie dependiendo del contenido adicionado a la mezcla. Para utilizar el material RAP en capas superficiales, se requiere emplear los ensayos apropiados para caracterizarlos y evaluar sus propiedades (por ejemplo: el ensayo PAVF de sus siglas en inglés Polished Aggregate Friction Value - Valor de Fricción de Pulimento del Agregado).

Se desarrolló un estudio sobre el efecto del RAP en mezclas asfálticas como capas de rodadura, en términos de resistencia al deslizamiento (McDaniel, Kowalski, & Shah, 2012). Se realizaron ensayos de resistencia al deslizamiento sobre ocho caminos existentes. Siete de ellos correspondían a caminos de bajo volumen de tránsito cuyas capa de rodadura contenían entre el 15 y 25% RAP. El otro fue un camino interestatal que poseía dos secciones de ensayo, una con mezcla de control (0% RAP) y la otra con el 15% RAP. Los caminos de bajo volumen de tránsito se mantuvieron en servicio por un periodo de un año mientras que el camino interestatal se mantuvo en servicio por cerca de 10 años. El ensayo de resistencia al deslizamiento se desarrolló con el equipo de rueda bloqueada de acuerdo con la norma ASTM E274:1997. Todos los caminos de bajo volumen de tránsito tuvieron un desempeño de resistencia al deslizamiento aceptable mientras que las dos secciones del camino interestatal mostraron un pobre desempeño, probablemente debido a su tiempo de servicio.

Otra parte de esta investigación consistió en la fabricación de bloques en el laboratorio y someterlos al ensayo de resistencia al deslizamiento. Los resultados mostraron una reducción gradual de la resistencia al deslizamiento con el incremento del RAP. Los experimentos mostraron una resistencia al deslizamiento aceptable para mezclas que contenían hasta un 25% RAP y se recomendó que debe estudiarse detalladamente a contenidos mayores (por ejemplo con un 40% RAP) (McDaniel, Kowalski, & Shah, 2012).

c) Desempeño ambiental de mezclas asfálticas

Una de las preocupaciones primordiales acerca de la utilización del RAP es su efecto sobre la durabilidad de la mezcla asfáltica. La susceptibilidad a la humedad es vista como la causa principal de una durabilidad deficiente y se puede ocasionar debido a la pérdida de cohesión entre el asfalto y el agregado, usualmente debido a la intrusión de la humedad. A este fenómeno se le denomina “denudamiento” (del inglés “Stripping”)

y frecuentemente se inicia en la parte superior del pavimento y progresa hacia la parte inferior, dando como resultado la desintegración de la capa (“Raveling” en inglés). La propiedad de susceptibilidad a la humedad se puede evaluar desarrollando ensayos de estabilidad, módulo resiliente o resistencia a la tracción sobre muestras sin acondicionar y acondicionadas (denominado ensayo TSR por sus siglas en inglés “Tensile Strength Ratio”) (Al-Qadi, Aurangzeb, Carpenter, Pine, & Trepanier, 2012).

A continuación se presentan diversas conclusiones de estudios desarrollados sobre la sensibilidad a la humedad de mezclas asfálticas con RAP:

- Debido a que los agregados del RAP están cubiertos con asfalto, presentan menor absorción de agua. Diversos estudios han confirmado que el potencial de daño por humedad en las mezclas asfálticas con RAP no es mayor que el de las mezclas convencionales y se ha concluido que la resistencia al daño por humedad mejora a medida que se incrementa el contenido de RAP (Karlsson & Isacsson (2006), Elwardany & Daniel (2011), Tran, Taylor, & Willis (2012), Al-Qadi, Aurangzeb, Carpenter, Pine, & Trepanier (2012), Mogawer, y otros (2012).
- El estudio denominado NCHRP 9-46 evaluó la susceptibilidad a la humedad de mezclas asfálticas con RAP con diferentes grados de asfalto, distintas fuentes de agregados y una variedad de contenidos de RAP, empleando el ensayo de relación de resistencia a la tracción (*IRTS*). El umbral mínimo generalmente establecido para esta relación de 80% no se alcanzó en algunos casos para las mezclas con altos contenidos de RAP; sin embargo, la adición de aditivos anti-stripping fue suficiente para mejorar el desempeño al nivel requerido (West, Willis, & Marasteanu, 2013).
- Se realizó un estudio en planta sobre mezclas con contenidos superiores al 15% RAP, las cuales fueron colocadas como capas de base y de rodadura en un

camino de New South Wales (Distin & Crabb, 2011). Se extrajeron muestras inmediatamente después de su compactación y después de dos años de servicio y se sometieron a un ensayo de sensibilidad a la humedad. Los resultados indicaron que todas las mezclas tanto de base como de rodadura cumplieron con los requerimientos mínimos de relación de resistencia a la tracción del 80%, incluso las muestras tomadas a los dos años de servicio del camino.

- Un estudio sobre mezclas tipo SMA (Stone Mastic Asphalt) encontró que la relación de resistencia a la tracción en el ensayo de sensibilidad a la humedad se incrementó con el incremento del contenido de RAP (Watson, Vargas-Nordbeck, Moore, Jared, & Wu, 2008).
- Diversos estudios sugieren tener en cuenta los siguientes factores que pueden influenciar la sensibilidad a la humedad de las mezclas con RAP:
 - ✓ Si la mezcla asfáltica recuperada tuvo anteriormente problemas de denudamiento, probablemente el problema ocurrirá de nuevo si no se incluye un aditivo a la nueva mezcla para mejorar la adhesión entre el agregado y el asfalto.
 - ✓ La tecnología de producción de mezclas también puede tener un efecto significativo sobre su desempeño a la humedad. Por ejemplo, un mezclado deficiente entre los asfaltos residual y nuevo o una temperatura de descarga baja, serán razones para producir mezclas con baja resistencia a la humedad (Mogawer, y otros, 2012).

3.3 Resumen del capítulo

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo se pueden extraer los siguientes comentarios y conclusiones:

- Existe un consenso generalizado que una mezclas asfáltica con incorporaciones de RAP hasta un 15% su desempeño es similar a una mezcla patrón (0% RAP). Sin embargo, para contenidos de RAP mayores al 20%, el desempeño de la mezcla comienza a ser más dependiente de la calidad de la fuente de los materiales por lo que se requiere de estudios más cuidadosos y específicos. En esta investigación se proponen incorporaciones de RAP de hasta un 50% sin incorporación de agentes de reciclaje que permitirá analizar algunas propiedades mecánicas en el laboratorio pero no el desempeño en servicio de las mezclas.
- La literatura consultada expone claramente diversas investigaciones y estudios sobre la caracterización de mezclas asfálticas con RAP. Se referencia un buena cantidad de resultados sobre las propiedades fundamentales definidas por las tres categorías de desempeño. Sin embargo, este panorama no es así de completo en Chile y se evidencia una falta de estudios e investigaciones que permitan establecer una normativa clara y ajustada a las condiciones del país. Se requiere hacer un levantamiento más completo del uso de agentes rejuvenecedores y ablandadores para ser empleados en mezclas con altas incorporaciones de RAP (> 25%).
- La tendencia general es que la resistencia a la fisuración de una mezcla asfáltica aumenta con el incremento en el contenido de RAP. No ocurre lo mismo con la resistencia a la fatiga ya que existen reportes bastante contradictorios en donde unos claramente expresan que la vida a la fatiga se disminuye con el incremento del RAP, mientras que los otros reportes especifican totalmente lo contrario. Por lo que se puede aconsejar realizar estudios específicos para cada proyecto que utilice determinados materiales o de fuentes diferentes o desconocidas.

- En cuanto al ahuellamiento se establece que la incorporación de RAP aumenta la resistencia de la mezcla a sufrir deformaciones permanentes. No obstante, se debe poner especial cuidado cuando se empleen agentes rejuvenecedores o ablandadores de asfalto especialmente al inicio de la etapa de difusión ya que este agente hace más blanda la capa más superficial del asfalto permitiendo acumular deformaciones y produciendo ahuellamiento.
- Con relación al desempeño funcional de las mezclas asfálticas con RAP, los estudios consultados indican que la resistencia al deslizamiento de las capas de rodadura compuestas es aceptable para mezclas con contenidos de RAP hasta un 25%. Para contenidos superiores deberán hacerse los estudios correspondientes enfatizando en algunas actividades claves en su diseño como por ejemplo: corrección de la granulometría o cambio de la misma y uso de materiales vírgenes con un porcentaje de chancado superior.
- La literatura consultada muestra que las mezclas con contenidos de RAP tienen un desempeño similar a las mezclas patrón en cuanto a su sensibilidad a la humedad. La mayoría de los trabajos consultados reportan que las mezclas cumplieron con el umbral mínimo del 80% de la relación de resistencia a la tracción.
- La literatura estudiada recomienda el fraccionamiento del RAP como buena práctica para el diseño y construcción de las mezclas asfálticas que incluyan material recuperado (RAP).
- Muchos trabajos sugieren estudiar el desempeño de las mezclas asfálticas recicladas con mayores contenidos de RAP en terreno o bajo ensayos de carga acelerada. Esto ayudará a comparar el desempeño de estas mezclas en laboratorio con su desempeño en terreno.

- Se propone una clasificación alternativa para identificar los tipos de reciclado de pavimentos asfálticos. Esta identificación es meramente funcional y ayuda a conceptualizar el tipo de procedimientos que se deben aplicar
- Se requiere impulsar un conocimiento más acabado sobre el material asfáltico recuperado (RAP) tanto de sus características física, química y mecánica. Muchas son las variables que pueden modificar el futuro desempeño de la mezclas asfáltica si se desconocen o no se reconocen aspectos fundamentales en la composición del RAP, del agregado y del asfalto residual, tales como: el grado de envejecimiento u oxidación del asfalto residual, tipo y propiedades de los agregados (calidad) y el grado de mezclado de los asfaltos residual y virgen.
- Se elaboró un anexo que abarca los puntos fundamentales para mejorar las prácticas para el manejo y gestión del material recuperado RAP en planta. Se hace énfasis que ésta es una etapa imprescindible para garantizar una mezcla asfáltica reciclada con un buen diseño y propiedades que le permitan desempeñarse en terreno de acuerdo a las exigencias estructurales, funcionales y del medio ambiente.
- El análisis volumétrico de una mezcla con incorporación de RAP es un paso que implica actuar con buen criterio y conocimiento. El diseño de la mezcla requiere una evaluación y determinación de la gravedad específica bruta de los agregados del RAP lo más exacta posible ya que afecta directamente las propiedades volumétricas de las mezclas. Una mala determinación o un criterio mal empleado puede dar la posibilidad de rechazar una mezcla con buenas características o aceptar otra que no cumple con los requerimientos de diseño y desempeño.
- Tres métodos están disponibles para la determinación de la gravedad específica bruta de los agregados del RAP: el método directo, el de substitución y el del retro-cálculo. El Instituto del Asfalto prefiere los dos últimos. Es recomendable que se pueda establecer la propiedad de absorción de asfalto de los agregados para

establecer su gravedad específica bruta o calcularla a través de la medición de la gravedad teórica máxima del RAP (G_{mm}^{RAP}).

- Una mezcla asfáltica reciclada se puede diseñar mediante las metodologías Marshall y Superpave utilizando su conceptualización original. Ambos métodos suponen una mezcla total del asfalto residual y virgen adicionado a la mezcla.
- La revisión bibliográfica sugiere la necesidad de plantear investigaciones futuras relacionadas con el grado de mezclado del asfalto residual y el asfalto nuevo para una nueva mezcla asfáltica con incorporación de RAP, analizando sus implicancias en el método de diseño y el desempeño en servicio de la mezcla. Este aspecto también será importante para entender el comportamiento de mezclas asfálticas para bloques.
- Se puede considerar explorar el diseño de mezclas asfálticas recicladas a través de nuevas alternativas como: mezclas tibias (warm mix), asfalto espumado e incorporación de aditivos ablandadores y rejuvenecedores. Todo esto con el objetivo de construir una caracterización más completa de las mezclas asfálticas recicladas en sus distintas alternativas posibles para su fabricación y utilización en bloques de asfalto.

4. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CON RAP PARA BLOQUES

Este capítulo presenta el trabajo de investigación realizado para definir la fórmula de diseño de mezcla a ser utilizada en la producción de bloques de asfalto incorporando material RAP.

Existen diferentes métodos para el diseño de mezclas asfálticas tanto en Europa como los Estados Unidos. En Estados Unidos la normativa AASHTO incluye dos procedimientos tradicionales que se utilizan desde la década de los 50: Hveem y Marshall. En el año 1993 se incorporó un nuevo método denominado Superpave el cual en la actualidad ha sido adoptado parcialmente por varias agencias en el mundo. La metodología Superpave es una metodología mecanicista que incorpora conceptos de diseño más racionales que las propuestas anteriores. La metodología Superpave define solo tres criterios para el diseño de mezclas: prevenir fatiga, prevenir ahuellamiento y prevenir fisuración térmica.

Si se tienen en cuenta los nuevos criterios de diseño de Superpave se puede demostrar que para el diseño de mezclas para bloques se requiere modificar estos criterios de diseño. Un pavimento articulado no va a experimentar las mismas fallas que un pavimento de asfalto normal, por las siguientes razones:

- Un pavimento articulado no presentará falla por fatiga. En particular, las dimensiones del bloque de asfalto ha sido pensada para que el elemento bloque no acumule fatiga.
- Del mismo modo, debido al tamaño del bloque, los esfuerzos de contracción por bajas temperaturas son menores y son resistidos sin que el bloque se agriete. La distancia de grietas transversales producidas por retracción térmica varía desde 2,0 a 3,5 m. La longitud máxima del bloque a considerar es de 0,25 m.
- En un pavimento normal se debe compatibilizar rigidez con fluencia (ahuellamiento). Para el caso del bloque se requiere optimizar la rigidez y así reducir la probabilidad de ahuellamiento al mínimo. Para cuando se trata de bloques de asfalto en los cuales se

incorpora RAP la mezcla permite de cierta manera controlar la posibilidad de ahuellamiento debido a la mayor rigidez que aporta el asfalto residual envejecido del RAP.

De acuerdo con los argumentos expuestos, se requirió definir nuevos criterios de diseño para la mezcla del bloque que estuvieran en concordancia con las características propias de diseño del bloque y de las condiciones para su fabricación, almacenamiento y construcción. Basado en las primeras experiencias piloto se propusieron los siguientes criterios:

- Optimizar rigidez de la mezcla para evitar deformaciones durante el almacenamiento. La Figura 4-1 muestra la falla por fractura de los bloques durante su almacenamiento.
- Optimizar resistencia a la tracción del bloque para asegurar buen comportamiento mecánico frente a solicitaciones de tránsito y conservar la integridad del bloque durante su manipulación.
- Optimizar sensibilidad a la humedad para asegurar durabilidad.



Figura 4-1: Deformaciones del bloque de asfalto durante el almacenamiento

4.1 Materiales utilizados en el estudio

Los materiales utilizados en el estudio se obtuvieron de la planta de producción de mezclas asfálticas de la empresa Asfaltos Quilín. Las características y criterios de selección de los materiales se presentan a continuación.

4.1.1 Agregado virgen

El agregado virgen corresponde al material empleado para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente de planta de la empresa Asfaltos Quilín. Estos materiales cumplen especificaciones para proyectos viales a cargo del Ministerio de Obras Públicas y el SERVIU Metropolitano. Este material fue tamizado y separado en fracciones para poder ser mezclado posteriormente en diferentes proporciones con el RAP.

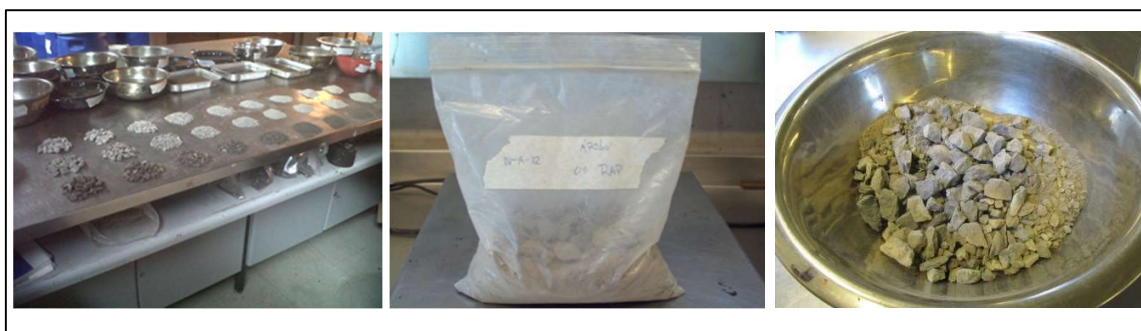


Figura 4-2: Separación por tamaños del agregado virgen

4.1.2 Material RAP

El RAP utilizado proviene principalmente de fresado de pavimento de la calle General Souper en la Comuna de Santiago Centro. Este material fue tamizado y separado en

fracciones para poder ser mezclado posteriormente en diferentes proporciones con el agregado virgen. La Figura 4-3 muestra el acopio del RAP y el RAP tamizado.

El contenido de asfalto residual del RAP fue obtenido mediante extracción por centrífuga para dos fracciones de tamaños: una fracción corresponde al material retenido sobre el tamiz 5 mm y la otra fracción corresponde al material pasante del tamiz 5 mm. Los valores de asfalto residual obtenidos fueron 4% y 7%, respectivamente.



Figura 4-3: Acopio y separación por tamaños del RAP

4.1.3 Propiedades del material combinado

El material combinado (agregado virgen más RAP) se ajustó para las bandas granulométricas tipo: IV-A-12 (MOP) y ARZ (Superpave). Se eligió la IV-A-12 (semi-densa) debido a que corresponde a la granulometría utilizada por el Ministerio de Obras Públicas de Chile para la capa de rodadura en la mayoría de proyectos de pavimentación. Se eligió la ARZ debido a que es una granulometría más densa que la anterior buscando obtener una mezcla de mayor durabilidad. Esta granulometría es recomendada por el programa Superpave para mezclas finas y densas. La Tabla 4-1 y la Figura 4-4 presentan las granulometrías utilizadas.

Tabla 4-1: Descripción de las granulometrías de estudio

Granulometría tipo	Descripción
IV-A-12	Granulometría tipo semi-densa, utilizada por el Ministerio de obras públicas de Chile como capa de rodadura
ARZ	Granulometría tipo densa que pasa por encima de la zona de restricción según la descripción SUPERPAVE (ARZ = Above Restriction Zone)

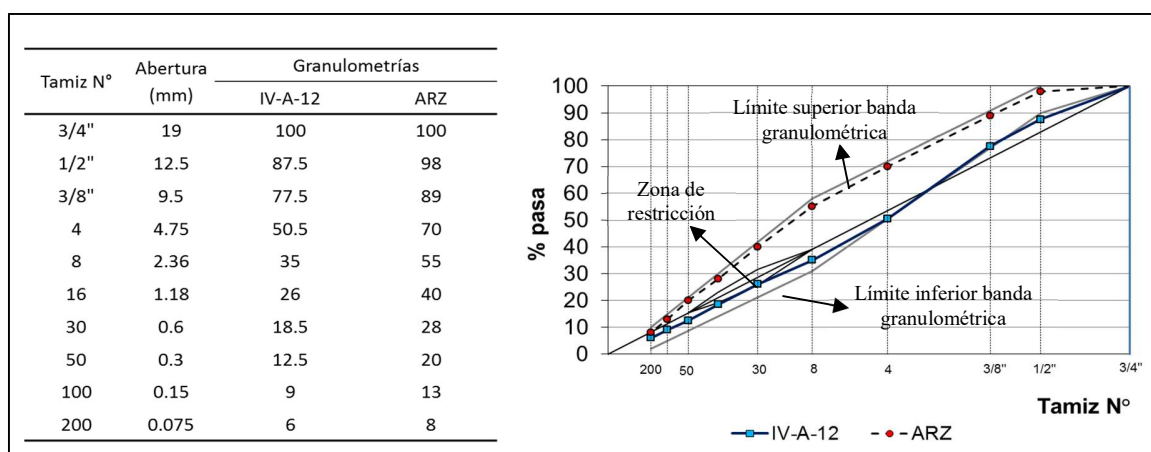


Figura 4-4: Granulometrías utilizadas en la investigación

4.1.4 Asfalto

Se eligieron los dos tipos de asfalto más comunes que se comercializan en Chile en proyectos viales: CA-14 y CA-24 (sin polímeros) y un asfalto modificado tipo elastomérico (de marca Stylink) cuyo uso aún no se masifica en Chile. El empleo de un asfalto elastomérico se incluyó para evaluar de forma relativa si se mejoraba las propiedades mecánicas del bloque con RAP.

4.2 Diseño de mezclas para bloques

El diseño de mezclas para la producción de bloques de asfalto no requiere cumplir con los criterios de diseño utilizados para la producción de mezclas en pavimentos tradicionales. También, debido a que se considera el uso de RAP, se requiere tener en consideración los dos siguientes factores:

- El RAP sufre un re-proceso en planta pero siempre presenta variabilidad respecto del contenido de asfalto residual. Esto se debe a que las fuentes de origen del RAP pueden ser diversas y con diferentes condiciones de diseño, y tiempo de servicio (envejecimiento).
- En una mezcla asfáltica reciclada en caliente se produce una combinación entre el asfalto virgen y el asfalto residual presente en el RAP, la cual tendrá una rigidez alta. En el caso del diseño de la mezcla del bloque se desea controlar la rigidez de la mezcla a través de las propiedades reológicas del asfalto combinado y la granulometría. Estas rigideces se mencionarán y analizarán más adelante.

El estudio se realizó en cinco etapas. Las primeras tres etapas dicen relación directa con los objetivos principales, y las Etapas 4 y 5 se pueden considerar complementarias de la investigación. La Figura 4-5 presenta el esquema con las cinco etapas de investigación. Cada etapa tiene asociado el objetivo planteado en su desarrollo y los ensayos de laboratorio propuestos para su cumplimiento.

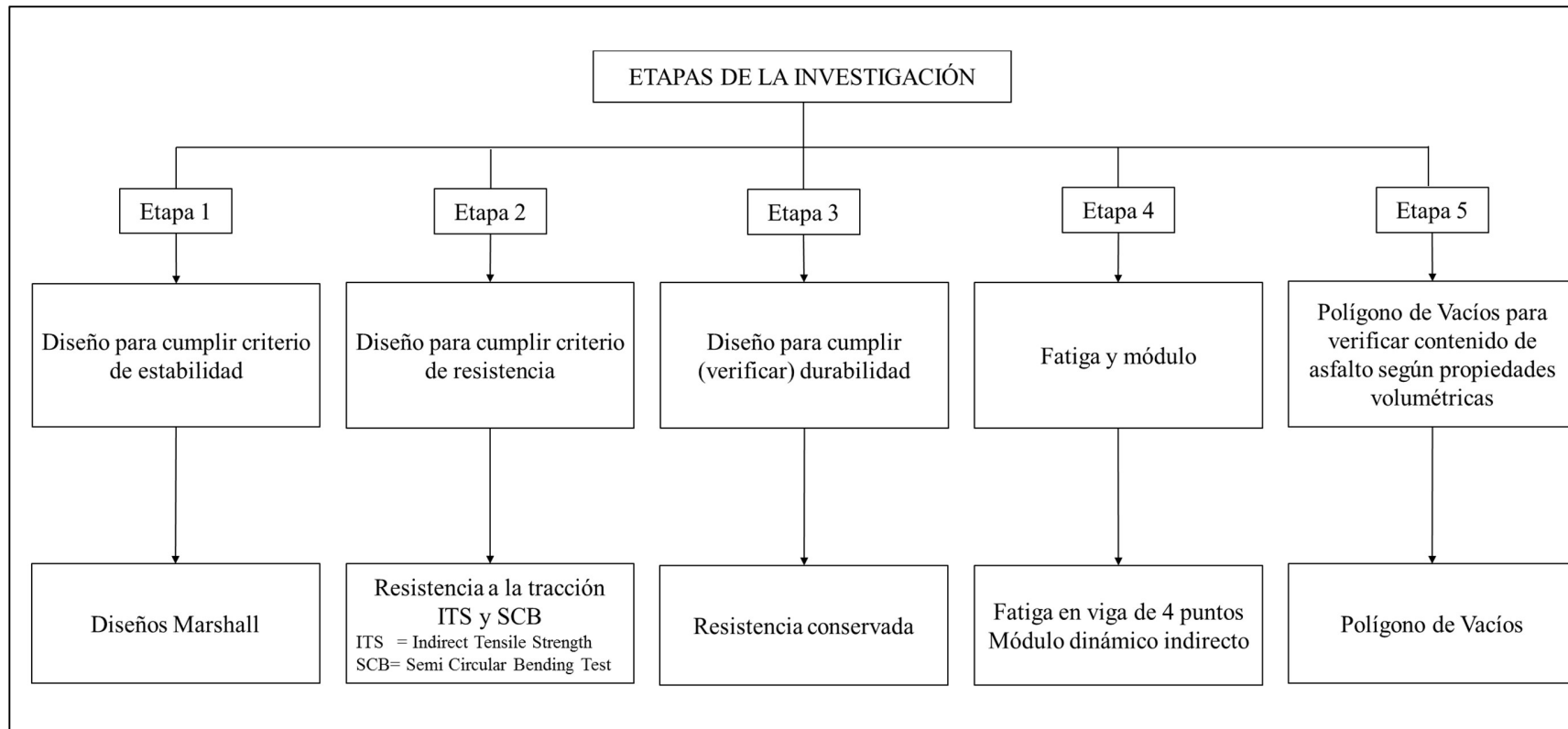


Figura 4-5: Etapas de la investigación

4.2.1 Etapa 1. Diseño criterio de estabilidad

Inicialmente se planteó utilizar directamente el criterio de la “máxima” estabilidad Marshall, pero se consideró que el comportamiento general de la mezclas (mezclado y compactación) quedaba mejor controlada por las propiedades volumétricas y no la máxima rigidez de la mezcla. Por lo cual, se resolvió finalmente utilizar las propiedades volumétricas del mismo modo que se utiliza en el diseño de una mezcla tradicional. De este modo, a partir de la Etapa 1 se obtiene la primera aproximación del contenido óptimo de asfalto, pero considerando que se realizarán dos verificaciones adicionales al contenido óptimo. Estas son: verificación de resistencia a la tracción (Etapa 2) y verificación de la durabilidad (Etapa 3).

Una mayor o menor densificación implica una determinada cantidad de vacíos de aire (V_a), lo que es fundamental para el desempeño de la mezcla debido a que un contenido alto de V_a (mayores al 8%) podría acelerar la oxidación y el envejecimiento del asfalto mientras que un contenido bajo de V_a (menores al 3%) podría reducir la estabilidad principalmente durante el almacenamiento. Del mismo modo, entre más gruesa sea la película de asfalto que recubre los agregados, más durable es la mezcla. Esta condición generalmente es controlada mediante los Vacíos en el Agregado Mineral (VAM). No obstante, si el VAM es muy alto la mezcla podría presentar problemas de estabilidad y resultará poco económica.

Por lo tanto, se mantuvo como primer criterio para determinar el contenido de asfalto de mezclas con RAP, las propiedades Volumétricas (V_a y VMA) al igual que en mezclas tradicionales.

4.2.2 Etapa 2. Criterio de resistencia a la tracción

Para asegurar la integridad del bloque durante el proceso de transporte, manipulación y almacenamiento se consideró la resistencia a la tracción. Además, cuando la carga del tránsito y, en particular, cuando la posición de la rueda de carga presente una excentricidad respecto del centro de gravedad del bloque, éste puede quedar sometido a esfuerzos de tracción, lo que refuerza la idea del empleo de la resistencia a la tracción como criterio de diseño de mezcla (sin embargo, y como se explica en el capítulo de diseño del bloque, tanto las dimensiones de éste como sus condiciones de trabazón lateral deberían impedir que el bloque como unidad quede sometido a esfuerzos de tracción mayor comparado con un bloque sin trabazón).

El ensayo de resistencia a la tensión indirecta (ITS) tradicionalmente se ha utilizado para caracterizar las propiedades de resistencia a la tracción de las mezclas asfálticas (Kim & Wen, 2002; Roque & Buttlar, 1992). Aunque el ensayo ITS presenta ventajas tales como el montaje simple para el ensayo y la facilidad de obtención de la probeta, también tiene algunas desventajas como por ejemplo la indentación producida en los puntos de compresión que modifica la distribución de tensiones en el plano de falla como se puede ver en la Figura 4-6, entregando mayor variabilidad en los resultados (Kim & Wen, 2002; Van de Ven & Smit, 1997).

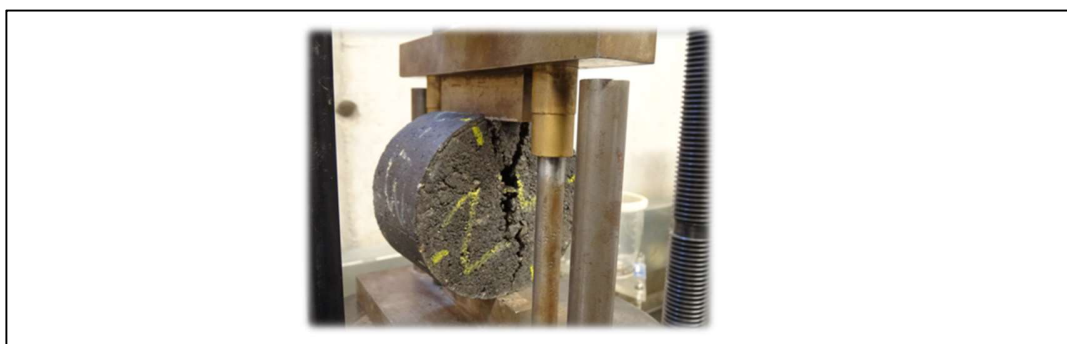


Figura 4-6: Indentación de una probeta asfáltica por carga de compresión

En los últimos años, se le ha dado mayor atención al ensayo de viga semi-circular (Semi Circular Bending Test - SCB), el cual fue originalmente utilizado para caracterizar la resistencia a la fractura en mecánica de rocas y posteriormente se aplicó a las mezclas asfálticas para caracterizar las propiedades de resistencia a la tracción y resistencia a la fatiga aplicando el modo uno (I) de fractura más simple de este material (Huang , Xiang, & Tang, 2005). Este ensayo fue aprobado como norma UNE-EN 1207-44 por el Comité de Estandarización Europeo (CEN - European Committee Standarization). El ensayo SCB consiste en una probeta de mezcla asfáltica semi-circular, apoyada en dos puntos y cargada a flexión en el punto central (Figura 4-7). El ensayo se realiza a una tasa de deformación constante y a diferentes temperaturas. La carga máxima, $F_{máx}$, y la deformación vertical, ΔW se determinan a partir de los resultados del ensayo. La deformación asociada a la fuerza máxima, $\varepsilon_{máx}$, se determina de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{máx} = \frac{\Delta W}{W} \times 100\% \quad (4.2)$$

Donde:

W = altura de la probeta (mm)

ΔW = desplazamiento vertical a la máxima fuerza (mm)

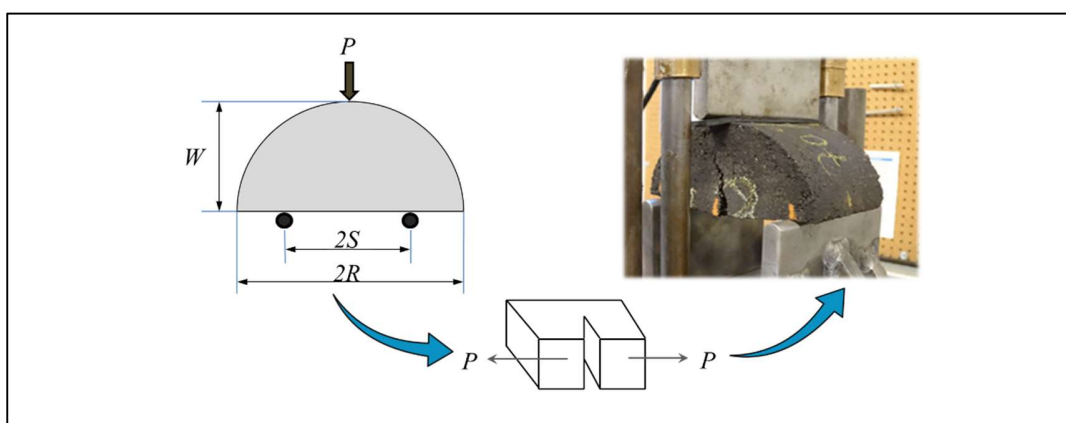


Figura 4-7: Conceptualización del ensayo SCB

El máximo esfuerzo horizontal $\sigma_{m\acute{a}x}$ está dado por:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{4.263 \times F_{m\acute{a}x}}{D \times t} \quad (4.3)$$

Donde:

D = diámetro (mm), igual a 2R

t = espesor (mm)

$F_{m\acute{a}x}$ = fuerza máxima (N)

El proyecto de investigación consideró utilizar ambos ensayos (ITS y SCB) de modo de evaluar cual presenta mejores ventajas para el diseño y control de mezclas para bloques. Las principales ventajas que se identificaron al ensayo SCB como posible reemplazo de ITS son:

- Se reduce el efecto de indentación y la tracción se aplica de forma directa.
- Al aplicar tracción en forma directa se simula de mejor forma las tensiones que se producirían en el bloque de asfalto. Esta última ventaja es especialmente importante cuando se desea comparar el valor de tracción última de la probeta utilizada en el diseño de mezcla con el valor de tracción última de ensayos de control realizados directamente en el bloque de asfalto.
- Se duplica el número de muestras.

4.2.3 Etapa 3. Diseño para cumplir (verificar) durabilidad

Una mezcla asfáltica puede ver afectada su durabilidad principalmente debido a su sensibilidad a la humedad. Para que una mezcla se considere que no es susceptible al daño por humedad debe garantizar un límite mínimo de resistencia retenida de $ITSR >$

80% (Indirect Tension Strenght Retained). Para la presente investigación se utilizó la norma UNE-EN 12697-12 y UNE-EN 12697-23. El valor *ITSR* se calcula según la fórmula 4.4.

$$ITSR = \left(\frac{ITS_w}{ITS_d} \right) \times 100 \quad (4.4)$$

Donde;

ITSR = relación de la resistencia a la tracción indirecta, en porcentaje (%)

ITS_w = resistencia a la tracción indirecta del grupo en agua, en kilopascales (kPa)

ITS_d = resistencia a la tracción indirecta del grupo seco, en kilopascales (kPa)

4.2.4 Etapa 4. Fatiga y módulo

Independiente que la fatiga no controla el diseño del bloque de asfalto y que su módulo puede no ser relevante para el diseño de la estructura de pavimento, se consideró necesario realizar un estudio de fatiga de mezcla y módulo con el fin de comparar el comportamiento de la mezcla con y sin RAP y además tener una referencia de su comportamiento respecto de mezclas tradicionales de asfalto.

a) Fatiga de las mezclas asfálticas

Se realizaron un número limitado de ensayos a la fatiga en mezclas con y sin RAP. Se utilizó el ensayo de fatiga de viga de cuatro puntos de acuerdo con la norma AASHTO T-321-07.

b) Evaluación del Módulo

Se realizaron dos tipos de ensayos de módulo a la mezcla: Módulo Dinámico a tracción (MD – AASHTO TP 62-03)) y el Índice de Resistencia a la Tracción (IRT – UNE-EN 12697-23).

El MD es medido sometiendo las probetas a cargas dinámicas repetidas mientras que el IRT se determina a través del ensayo tradicional ITS mediante carga estática a velocidad constante. El objetivo específico de cada uno de estos ensayos es:

- El módulo dinámico: Este parámetro es utilizado para describir el cambio de la rigidez de una mezcla asfáltica medida en un rango de temperaturas y/o frecuencias de carga, representando la naturaleza visco-elástica del asfalto. Esto indica la manera de cómo su rigidez cambia al estar solicitada a las condiciones climáticas en un período de verano a uno de invierno o viceversa y cómo cambia para velocidades del tránsito.
- Índice de Rigidez a la Tracción (IRT): Para estimar este índice se utiliza la curva carga-deformación resultado del ensayo de tracción indirecta tradicional. El IRT se define como la relación entre la mitad de la carga máxima ($\frac{1}{2} F_{máx}$) y el desplazamiento correspondiente a ese valor de carga antes de la carga máxima (Δ_m), permitiendo conocer la pseudo rigidez del material, mostrando qué tan flexible o rígida es la mezcla asfáltica evaluada. A mayor IRT, menos flexible es la mezcla. La Figura 4-8 presenta una curva esfuerzo-deformación e identifica los parámetros necesarios para calcular el IRT.

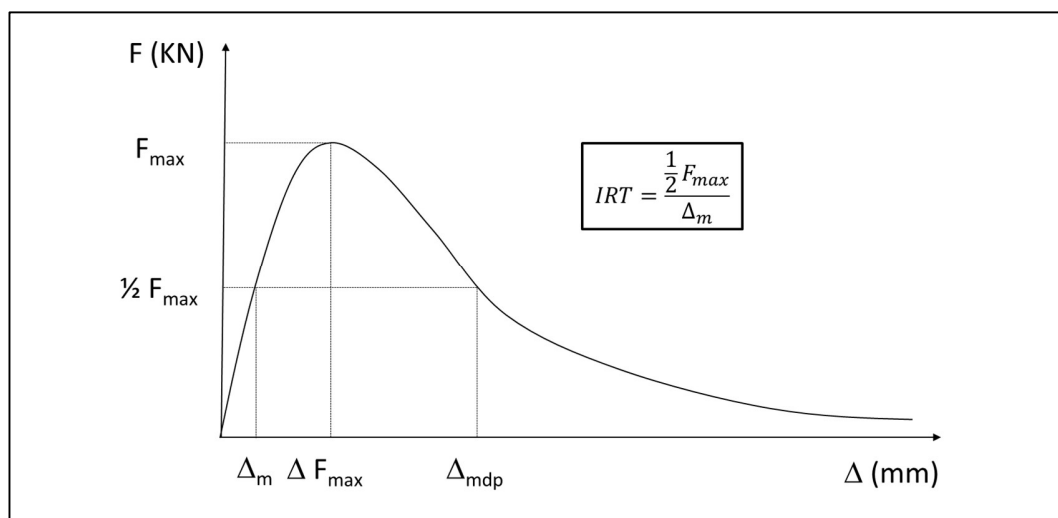


Figura 4-8: Curva carga-desplazamiento del ensayo de tracción indirecta

Donde;

- $F_{m\acute{a}x}$ = Carga máxima de rotura (kN)
 $\Delta F_{m\acute{a}x}$ = Deformación en el pico máximo de carga (mm)
 Δ_m = Deformación a la mitad de la carga máxima antes del pico máximo (mm)
 Δ_{mdp} = Deformación a la mitad de la carga posterior al pico máximo (mm)

4.2.5 Etapa 5. Empleo del Polígono de Vacíos para verificar el contenido de asfalto en base a las propiedades volumétricas

El Polígono de Vacíos es una herramienta analítica utilizada para obtener el contenido óptimo de asfalto para cualquier tipo de mezcla asfáltica en caliente basada solamente en las especificaciones de vacíos. Su fundamento se soporta en la aplicación de las relaciones gravimétricas y volumétricas de los materiales que componen una mezcla asfáltica.

Considerando la importancia de cumplir con las propiedades volumétricas (específicamente el 4% V_a) en mezclas con asfaltos de alta penetración y RAP, paralelamente se investigó la aplicabilidad del Polígono de Vacíos para la determinación del porcentaje de asfalto preliminar en mezclas para bloques, considerando que los agregados RAP aportan un contenido de asfalto que presenta una variabilidad significativa. El empleo de esta herramienta puede reducir el tiempo de análisis y diseño de mezcla.

4.3 Programa experimental y análisis de resultados

La Tabla 4-2 presenta la matriz experimental utilizada en esta investigación, especificando para cada una de sus etapas los tipos de ensayos realizados y las variables de diseño: granulometría, tipo de asfalto, contenido de asfalto, contenido de RAP y temperatura de ensayo.

Tabla 4-2: Matriz experimental de investigación

Variable de diseño	Etapla 1	Etapla 2	Etapla 3	Etapla 4		Etapla 5
	<i>Diseño Marshall</i>	<i>ITS-SCB</i>	<i>Resistencia conservada</i>	<i>Fatiga</i>	<i>Módulo</i>	<i>Polígono de Vacíos</i>
Tipo de granulometría	IV-A-12	IV-A-12, ARZ	IV-A-12	IV-A-12	IV-A-12	IV-A-12
Tipo de asfalto	CA-24	CA-24, CA-14, Stylink	CA-24	CA-24	CA-24	CA-24
Contenido de asfalto (%)	Desde 4.0 hasta 7.0 (cada 0,5%)	Desde 5.0 hasta 7.0	Desde 4.5 hasta 7.0	5.5	5.5, 6.0, 6.5	-
Contenido de RAP (%)	0, 10, 25, 40, 50, 70	0, 15, 25, 50	0, 25, 50	0, 25, 50	0, 25, 50	0, 10, 25, 40, 50, 70
Temperatura de ensayo (°C)	60	5, 10, 20	20	20	5, 10, 20	-

Para la fabricación de probetas en el laboratorio se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Inicialmente se planteó la idea de explorar mezclas constituidas hasta con un 100% de material recuperado (RAP). Sin embargo, debido a las limitaciones tecnológicas de las plantas asfálticas existentes en el país se determinó la imposibilidad de alcanzar contenidos altos de incorporación de RAP, por lo cual, se decidió investigar con mezclas hasta con un límite máximo del 70% en las Etapas 1 y 5, y hasta un 50% en las demás Etapas. Los intervalos de contenido de RAP se eligieron para cada etapa de acuerdo con la cantidad de probetas experimentales y cuidando de alcanzar los valores máximos anteriormente mencionados.
- Se emplearon temperaturas de mezclado y de compactación que oscilaron entre 155-160 °C y 145-150 °C respectivamente, según la carta de viscosidad de los asfaltos obtenida por el laboratorio de la empresa Asfaltos Quilín.

4.3.1 Etapa 1. Diseño para cumplir criterio de propiedades volumétricas (y estabilidad)

Las mezclas utilizadas para esta parte del estudio emplean: asfalto CA-24, granulometría tipo IV-A-12 y adiciones de RAP de 0, 10, 25, 40, 50 y 70%.

Para la determinación del contenido de asfalto óptimo empleando el primer criterio de diseño (Figura 4-5), el RAP se trata como un agregado más para su dosificación en peso al igual que el material virgen y se requirió determinar el contenido de asfalto residual presente en el RAP empleando la norma AASHTO T164 (Centrífuga). El contenido de asfalto residual obtenido fue: 5,5% (valor promedio para la fracción gruesa que contenía un 4.0% y la fracción fina que contenía un 7.0%).

El procedimiento para obtener el contenido óptimo de asfalto es como sigue:

a. Estimación de la Gravedad Específica Total del RAP (G_{sb}^{RAP})

El primer paso para diseñar una mezcla asfáltica reciclada en caliente es estimar la Gravedad Específica Total del RAP (G_{sb}^{RAP}). Debido a que la fuente de los agregados del RAP utilizados en esta investigación no es conocida y tampoco se conocen los registros de la construcción original, el valor de G_{sb}^{RAP} debe estimarse de acuerdo con uno de los tres métodos propuestos para ello (Mc Daniel & Anderson, 2001): directo, sustitución y retro-cálculo. Estos tres métodos se explican a continuación:

- Método directo: se estima el G_{sb}^{RAP} utilizando las normas AASHTO T84 y T85 para calcular la Gravedad Específica de los agregados del RAP finos y gruesos respectivamente, recuperados posteriormente al lavado del asfalto residual.
- Método de la sustitución: se mide directamente la Gravedad Máxima Teórica del RAP (G_{mm}^{RAP}) utilizando la norma AASHTO T209. Con este valor se estima la Gravedad Específica Efectiva del RAP (G_{se}^{RAP}), la cual se asume como G_{sb}^{RAP} . El valor del G_{mm}^{RAP} calculado para esta investigación fue de 2.322 g/cm³.
- Método del retro-cálculo: se utiliza el procedimiento desarrollado en el método de la sustitución, asumiendo posteriormente la absorción de los agregados para calcular el G_{sb}^{RAP} . El valor de absorción de asfalto de los agregados según experiencias en distintas plantas de asfalto de la Región metropolitana tuvo un valor promedio de 0,378%.

Una vez empleadas las normas asociada a los tres métodos explicados, se procede a estimar los valores de G_{sb}^{RAP} . La Figura 4-9 presenta los valores de G_{sb}^{RAP} calculados. Se observa que el valor de G_{sb}^{RAP} estimado por el método directo está alejado del promedio del valor estimado por los otros dos métodos. Este fenómeno se explica debido a que los agregados recuperados del RAP pueden quedar con residuos del solvente empleado para el lavado del asfalto residual o con residuos de asfalto

produciendo un cambio en su gravedad específica. Por esta razón, algunos investigadores recomiendan el empleo de los métodos de la sustitución y retro-cálculo para estimar el G_{sb}^{RAP} (Anderson & Murphy, 2004).

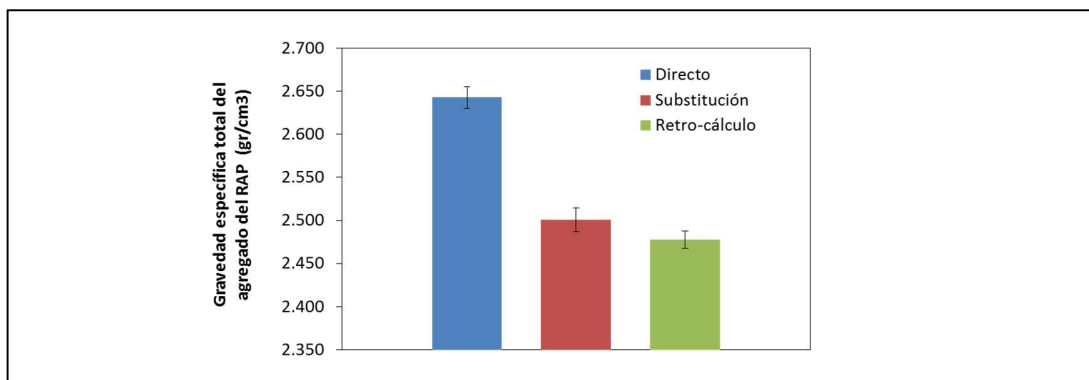


Figura 4-9: Gravedades específicas totales del RAP para los tres métodos con el error estándar para un 95% de confiabilidad.

Debido a que no se midió directamente la absorción de asfalto de los agregados en el laboratorio, se decidió utilizar el valor de G_{sb}^{RAP} estimado por el método de la sustitución para calcular los diseños Marshall. En el Anexo C se presenta una descripción detallada de los métodos utilizados para estimar la Gravedad Específica Total del RAP (G_{sb}^{RAP}).

b. Estimación del contenido de asfalto inicial como dato base para el diseño Marshall

Para calcular el asfalto inicial de prueba se siguió el procedimiento recomendado por el Instituto Norteamericano del Asfalto. Utilizando la granulometría IV-A-12 y aplicando la ecuación 3.1, se obtuvo un contenido de asfalto inicial base para los diseños Marshall de 5,4%. El procedimiento completo se presenta en el Anexo D.

De acuerdo con el procedimiento seguido, el contenido de asfalto virgen (nuevo) a incorporar se reduce proporcionalmente y de manera lineal a medida que se incrementa el contenido de RAP en las mezclas, como se presenta en la Figura 4-10. Estos valores están referidos al contenido de asfalto inicial base y representan el ahorro en la cantidad de asfalto virgen a incorporar cuando existe un aumento de RAP en la mezcla reciclada.

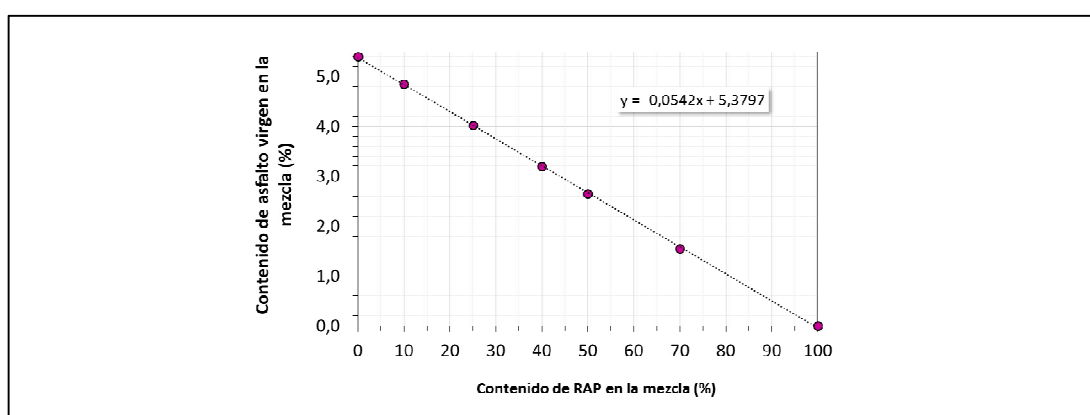


Figura 4-10: Contenido de asfalto virgen a incorporar en las mezclas recicladas según el porcentaje de RAP empleado

c. Diseño Marshall para mezclas recicladas en caliente

Se confeccionaron mezclas asfálticas en caliente con incorporación de 0, 10, 25, 40, 50 y 70% RAP. Se fabricaron probetas tomando como base el contenido de asfalto inicial estimado y con variaciones de $\pm 1,0\%$ de asfalto, para un total de 15 probetas por diseño (3 por cada contenido de asfalto), aplicando 75 golpes por cara. Posteriormente las probetas se ensayaron en la prensa Marshall. Los contenidos óptimos de asfalto se obtuvieron utilizando únicamente el criterio de los vacíos de aire en la mezcla (V_a) y se presentan en la Figura 4-11.

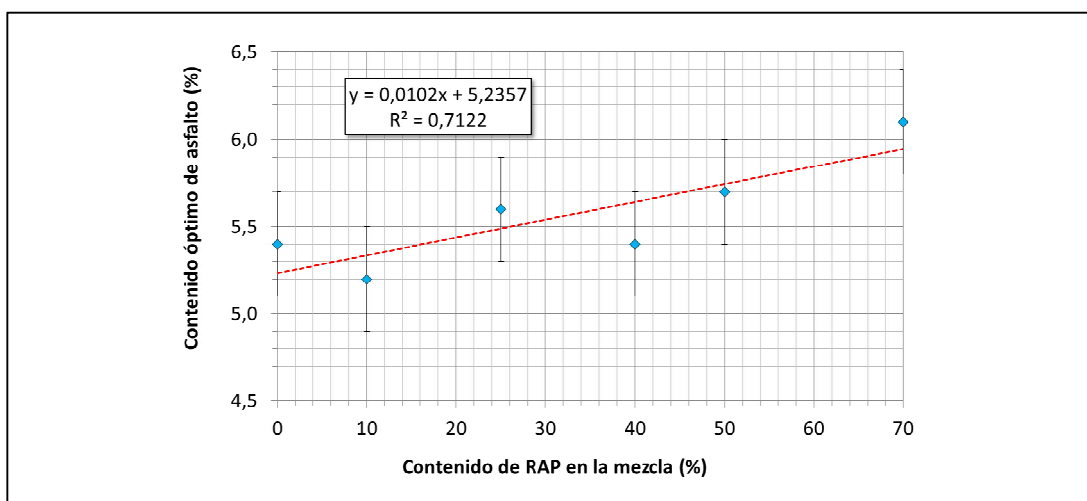


Figura 4-11: Contenidos óptimos de asfalto según el criterio de Vacíos de Aire

A partir del análisis de la Figura 4-11 se desprenden las siguientes consideraciones debido a que los resultados no son consistentes con los presentados en la Figura 4-10:

- Existe una tendencia de aumento del porcentaje óptimo de asfalto a medida que se incrementa el contenido de RAP en las mezclas. Esto se podría explicar por la existencia de caras libres de asfalto en los agregados del RAP a causa del proceso de fresado en terreno y del re-procesado en planta mediante un triturador de impacto.
- Empleando la tolerancia de $\pm 0,3\%$ de asfalto permitida en la normativa para la producción de mezclas asfálticas y representada por las barras de error verticales, se observa que la recta de regresión se encuentra dentro del rango establecido por el contenido óptimo de asfalto más su tolerancia, indicando que dicha recta es representativa de la tendencia obtenida.
- Una de las ventajas económicas más importantes de emplear RAP es el ahorro en la cantidad de asfalto virgen a adicionar a la nueva mezcla como se aprecia

en la Figura 4-10. Sin embargo, la Figura 4-11 muestra una tendencia contraria en donde el contenido de asfalto óptimo aumenta con el incremento del contenido de RAP. Esto significa que hay un aumento en la cantidad de asfalto virgen que se debe incorporar a la mezcla para poder alcanzar el óptimo requerido. No obstante, este aumento en la cantidad de asfalto virgen es inferior al ahorro que se produce por el aporte del asfalto residual del RAP como se presenta en la Tabla 4-3. Esta tabla se compone de tres partes: el ahorro teórico de asfalto virgen que se debiese obtener de acuerdo con el método del Instituto Norteamericano del Asfalto que corresponde a una reducción lineal del asfalto virgen requerido, el ahorro o incremento de asfalto según los óptimos obtenidos de los diseños Marshall y el ahorro total de asfalto virgen a adicionar a la mezcla que se obtiene mediante la suma de las dos partes anteriores. Los resultados muestran que en realidad no se consiguen los ahorros presupuestados por el método del Instituto Norteamericano del Asfalto debido a que, en la mayoría de los casos, hay que adicionar un poco más de asfalto virgen según los diseños Marshall de laboratorio (todos estos valores están referidos al 5,4% de asfalto como valor base de comparación). No obstante lo anterior, el ahorro total de asfalto virgen a adicionar corresponde aproximadamente al 80% del ahorro inicial planteado por el método del Instituto Norteamericano del Asfalto.

Los diseños Marshall completos se presentan en el Anexo E.

Tabla 4-3: Ahorro en el contenido de asfalto virgen a incorporar en una mezcla reciclada

		Contenido de RAP en la mezcla (%)					
		0	10	25	40	50	70
Según Instituto del Asfalto	Asfalto virgen a incorporar para alcanzar el contenido inicial de 5,4%	5,4	4,8	4,0	3,2	2,6	1,5
	Ahorro asfalto virgen respecto del 5,4%	0,0	-0,6	-1,4	-2,2	-2,8	-3,9
Según diseños Marshall	Contenido óptimo de asfalto según diseños Marshall (%)	5,4	5,2	5,6	5,4	5,7	6,1
	Ahorro asfalto virgen respecto del 5,4%	0,0	-0,2	+0,2	+0,0	+0,3	+0,7
Ahorro en asfalto virgen total (%)		0,0	-0,8	-1,2	-2,2	-2,5	-3,2

Nota: los valores negativos indican ahorro en porcentaje

4.3.2 Etapa 2. Diseño para cumplir criterio de resistencia

Esta etapa de la investigación se compuso de las siguientes partes:

- Evaluación de la resistencia a la tracción de las mezclas mediante los ensayos SCB e ITS para una temperatura de referencia de 20 °C. El objetivo de esta evaluación es determinar el contenido de asfalto que maximiza la resistencia a la tracción y verificar si este contenido de asfalto tiene relación con el porcentaje óptimo de asfalto determinado en la Etapa 1.
- Estudio de la correlación de los resultados de resistencia a la tracción obtenidos a través de estos dos ensayos (SCB vs ITS). El objetivo de esta correlación es validar los resultados del ensayo SCB con los estimados tradicionalmente mediante el ensayo ITS.

- Evaluación de la correlación de los resultados de resistencia a la tracción del ensayo SCB y la resistencia a la tracción de los bloques fabricados en terreno utilizando el ensayo de flexión en tres puntos. El objetivo de este estudio es determinar la posibilidad de realizar el control de la resistencia a la tracción de los bloques de asfalto mediante un ensayo de laboratorio más simple como el SCB.
- Comparación de la resistencia a la tracción SCB de mezclas con distintos tipos de granulometrías: ARZ y IV-A-12. El objetivo de esta parte de la Etapa 2 es analizar el efecto de la granulometría en la resistencia a la tracción de las mezclas utilizando una granulometría más fina (ARZ).
- Análisis complementario de la resistencia a la tracción mediante el ensayo ITS para distintos tipos de asfalto. El objetivo de utilizar otros tipos de asfalto en las mezclas fue evaluar la posibilidad de obtener mayores resistencias a la tracción y optimizarlas en un trabajo posterior.

a) Evaluación de la resistencia a la tracción mediante el ensayo SCB e ITS

Las mezclas utilizadas en esta parte del estudio emplean: asfalto CA-24, granulometría tipo IV-A-12 con adiciones de RAP de 0, 25 y 50%, contenidos de asfalto que oscilan entre 5,0 a 7,0 % y temperatura de ensayo de 20 °C.

Los resultados obtenidos para los ensayos SCB e ITS se presentan en la Figura 4-12 y Figura 4-13 respectivamente. El valor R^2 presenta valores superiores a 0,9 en todos los casos, indicando una buena correlación entre las variables representada por una ecuación de segundo grado. Estas ecuaciones permiten estimar los contenidos óptimos de asfalto que maximiza la propiedad de resistencia a la tracción. La Tabla 4-4 presenta una comparación de los contenidos óptimos de asfalto estimados en la Etapa 1 y en esta primera parte de la Etapa 2.

Tabla 4-4: Contenido óptimo de asfalto Etapa 1 y 2

	Contenido óptimo de asfalto		
	Etapa 1	Etapa 2	
Contenido de RAP (%)	<i>Marshall</i>	<i>SCB</i>	<i>ITS</i>
0	5,4	5,8	6,0
25	5,6	5,7	5,6
50	5,7	5,8	6,0

Los contenidos óptimos de asfalto estimados mediante los ensayos SCB e ITS son similares. Si se comparan estos valores con los estimados en la Etapa 1 se verifica que existe una relación entre ellos, ratificando la importancia que tienen los vacíos de aire en una mezcla si se quiere garantizar una resistencia a la tracción. La diferencia más importante se destaca para la mezcla sin incorporación de RAP; no obstante, al analizar la tolerancia permitida en las normas para el diseño de mezclas asfálticas esta diferencia prácticamente deja de existir.

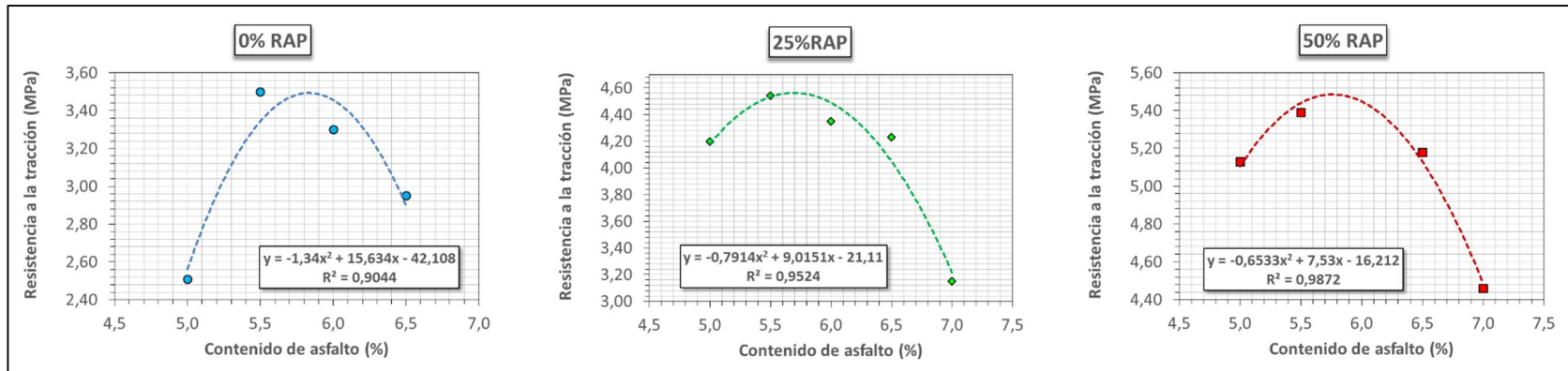


Figura 4-12: Resistencia a la tracción mediante el ensayo SCB

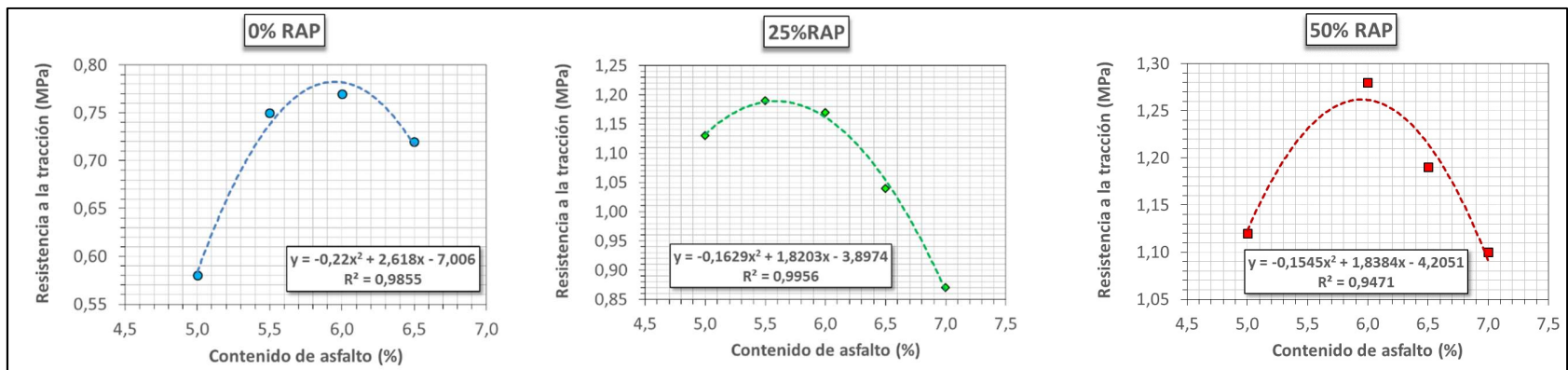


Figura 4-13: Resistencia a la tracción mediante el ensayo ITS

- b) Validación de la correlación de resultados de resistencia a la tracción obtenidos con los ensayos ITS y SCB

Las mezclas utilizadas en esta parte del estudio emplean: asfalto CA-24, granulometría tipo IV-A-12 con adiciones de RAP de 0, 25 y 50%, contenidos de asfalto de 5,5, 6,0 y 6,5 % y temperaturas de ensayo de 5, 10 y 20 °C.

La Figura 4-14 presenta la relación de resistencias a la tracción entre los ensayos ITS y SCB para los tres contenidos de RAP estudiados. Se obtuvieron correlaciones lineales con coeficientes de correlación (R^2) cercanos a la unidad. Esto demuestra que independientemente de la granulometría y del contenido de RAP en la mezcla, la relación entre la resistencia a la tracción SCB e ITS se conserva haciendo que los resultados sean comparables.

También se puede observar una mayor dispersión de los valores más altos de resistencia a la tracción, los cuales están relacionados con la temperatura más baja de ensayo que para este trabajo fue de 5 °C. Este fenómeno se explica debido a que a temperaturas bajas la mezcla asfáltica se rigidiza, presentado un comportamiento frágil en todos sus componentes (asfalto y agregados), por lo que la resistencia a la tracción ante la carga máxima está influenciada por la resistencia individual de estos materiales.

En la Figura 4-15 se incluyen 54 datos experimentales de la relación de resistencias a la tracción SCB e ITS incluyendo todas las variables estudiadas. El valor de R^2 es de 0.88 que se considera bueno para el propósito de la investigación. Estos resultados confirman la viabilidad de utilizar el ensayo SCB para evaluar las mezclas asfálticas recicladas para bloque y dejan de manifiesto que es posible seguir utilizando el ensayo ITS debido a que los resultados son comparables y convertibles para los dos ensayos.

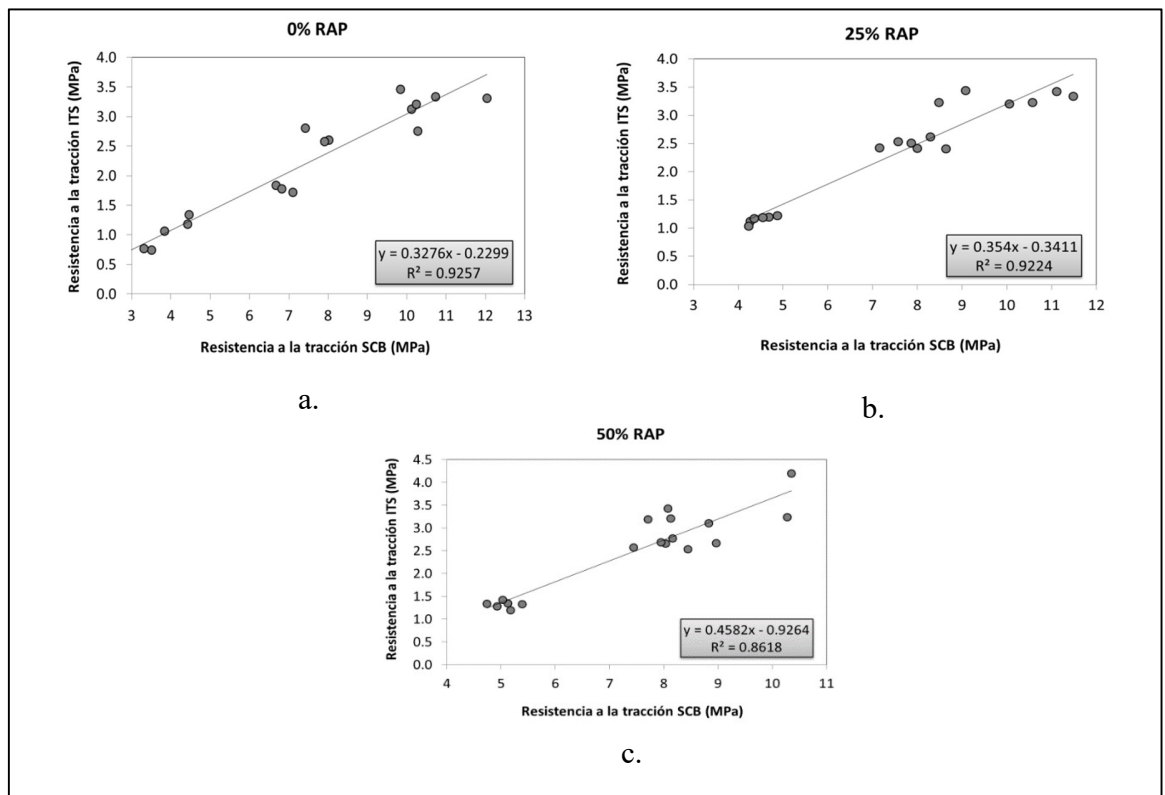


Figura 4-14: Correlación de la resistencia a la tracción para los ensayos ITS vs SCB

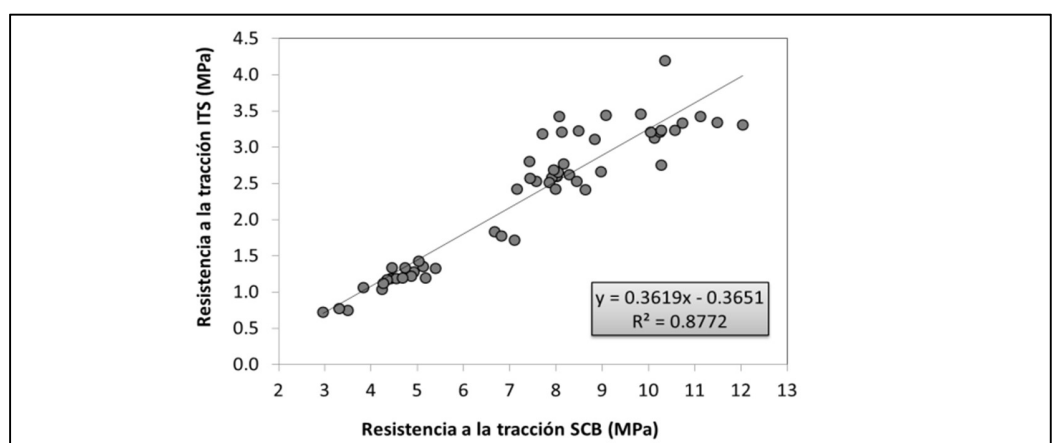


Figura 4-15: Correlación resistencia a la tracción para todas las variables estudiadas

c) Evaluación de la correlación de los resultados de resistencia a la tracción del ensayo SCB y la resistencia a la tracción del bloque

Las mezclas utilizadas en esta parte del estudio tanto en el laboratorio como los bloques en terreno emplean: asfalto CA-24, granulometría tipo IV-A-12 con adiciones de RAP de 0, 15 y 25%, un contenido de asfalto de 5,5% y temperatura de ensayo de 20 °C.

Los bloques fueron sometidos al ensayo de flexo-tracción utilizando la norma NCh1038-2009 (Flexión en 3 puntos) utilizando una temperatura de referencia de ensayo de 20 °C. La Figura 4-16 presenta los resultados del ensayo de bloques de asfalto fabricados en el terreno, obtenidos durante la construcción del modelo físico experimental descrito en el Capítulo 5. Durante la elaboración de las mezclas asfálticas recicladas con el 25% RAP se reportaron problemas en la planta de asfalto que le impidieron mantener una temperatura constante durante el proceso de mezclado. La Figura 4-16 muestra que la resistencia a tracción de las mezclas es relativamente homogénea independiente de la forma del bloque, lo que se esperaba debido a que esta característica es propia del material.

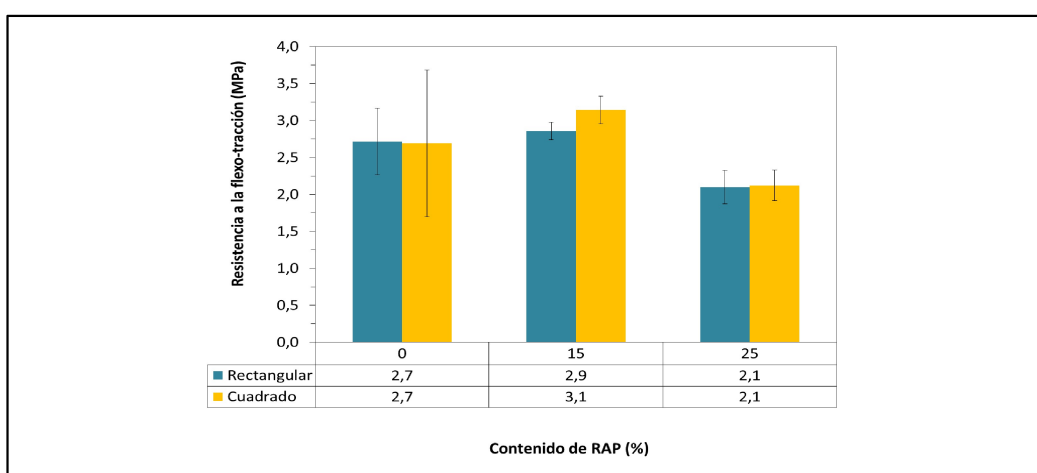


Figura 4-16: Resistencia a flexo-tracción de bloques de asfalto

Como se desea comparar el valor de tracción última de la probeta utilizada en el diseño de mezcla empleando el ensayo SCB con el valor de tracción última de ensayos realizados directamente en el bloque de asfalto (ambos a una temperatura de ensayo de 20 °C) se presenta la Tabla 4-5. Se observa la relación de resistencias a flexo-tracción de los bloques y de las probetas semi-circulares fabricadas tanto en el laboratorio como extraídas como testigos directamente de los bloques. En cuanto a la relación con las probetas de laboratorio, para las mezclas con 0 y 15% RAP se observa que la relación de resistencias es un valor constante de aproximadamente 1,3. Se puede atribuir que esta relación sea mayor que la unidad a la diferencia en los métodos de compactación empleados para fabricar los bloques en terreno y las probetas en el laboratorio. Para las mezclas con un 25% RAP la relación es mayor debido a la menor resistencia de tracción de los bloques, probablemente a causa de los problemas para su fabricación. En terreno se pudo constatar que la mezcla de los bloques era muy opaca y en algunos casos con una evidente falta de cohesión debido a un mal proceso de mezclado en planta, reduciendo la capacidad ligante del asfalto, la absorción de asfalto por parte de los agregados y promoviendo una mala compactación. Se recomienda repetir este análisis para mezclas con 25% RAP para verificar la relación de resistencias a la tracción. Para las probetas extraídas como testigos de los bloques, la relación de resistencias oscila entre 0,9 y 1,2 indicando una buena correlación entre las resistencias a flexo-tracción y la posibilidad de ejecutar controles de calidad de los bloques utilizando probetas semi-circulares.

Tabla 4-5: Relación de resistencia a tracción SCB vs bloques de asfalto

Contenido de RAP (%)	Resistencia a la tracción SCB (Mpa) probetas de:		Módulo de rotura bloque - MR (Mpa)		Relación de resistencia (SCB/MR)			
					Probeta laboratorio vs Bloque		Probeta testigo vs Bloque	
	Laboratorio	Testigos	Rectangular	Cuadrado	Rectangular	Cuadrado	Rectangular	Cuadrado
0	3,5	2,99	2,7	2,7	1,3	1,3	1,1	1,1
15	3,7	2,94	2,9	3,1	1,3	1,2	1,0	0,9
25	4,5	2,43	2,1	2,1	2,2	2,1	1,2	1,1

- d) Comparación de la resistencia a la tracción SCB de mezclas con distintos tipos de granulometrías: ARZ y IV-A-12.

Las mezclas utilizadas en esta parte del estudio emplean: asfalto CA-24, granulometrías tipo ARZ y IV-A-12 con adiciones de RAP de 0, 25 y 50%, contenidos de asfalto de 5,5, 6,0 y 6,5 % y temperaturas de ensayo de 5, 10 y 20 °C. A partir de los análisis de la Figura 4-18 se desprenden las siguientes consideraciones:

- Para las mezclas con 0% RAP, la granulometría ARZ presenta resistencias a la tracción mayores comparadas con las de la granulometría IV-A-12 para todas las temperaturas de ensayo. La mayor diferencia de resistencias a la tracción de la granulometría ARZ para 20 °C oscila entre un 22 y un 26%, para 10 °C entre un 5 y un 15% y para 5 °C entre un 5 y un 0%, mostrando una reducción gradual de la diferencia a medida que se disminuye la temperatura de ensayo. Esto se explica empleando la Figura 4-14 que corresponde a investigaciones de Shell (Pell, 1978), en donde un asfalto con rigidez alta (S_b), que puede deberse a temperaturas bajas, dará como resultado una mezcla con alta rigidez (S_m) y será un comportamiento exclusivo del asfalto, pero para asfaltos con rigidez baja (debido a temperaturas más altas), la rigidez de la mezcla dependerá de otros factores como la forma, textura y gradación del agregado.

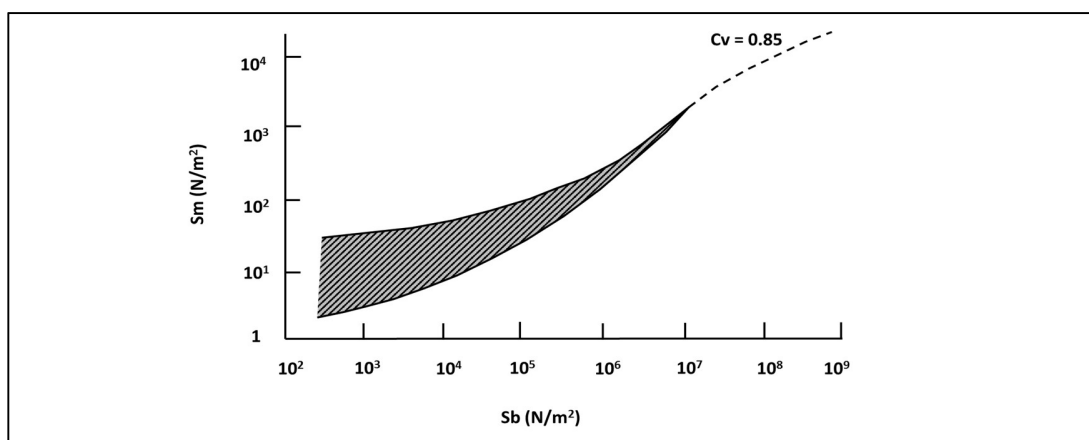


Figura 4-17: Relación entre rigidez de la mezcla y la rigidez del asfalto (Pell, 1978)

Para mezclas asfálticas sin incorporación de RAP se recomienda el uso de granulometrías con mayor proporción de partículas finas cuando se quiera obtener una mayor resistencia a la tracción.

Si se analizan los resultados tomando como referencia la temperatura de ensayo de 20 °C, las mezclas elaboradas con la granulometría ARZ presenta los mayores valores de resistencia para los contenidos de RAP de 0 y 25%. Esta tendencia ya no es clara para mezclas con 50% RAP pudiéndose utilizar las dos granulometrías para su fabricación obteniéndose valores de resistencia a la tracción muy similares. Por lo tanto, a medida que se incrementa el RAP en la mezcla, la diferencia de las resistencias a la tracción entre las dos granulometrías se reduce debido a la mayor rigidez adquirida por la mezcla de los asfaltos virgen y residual, fenómeno que puede explicarse nuevamente con la Figura 4-17.

- Para contenidos de 25 y 50% RAP, y temperaturas de ensayo menores a 10 °C, en la mayoría de los casos es la granulometría IV-A-12 la que presenta las mayores resistencias a la tracción.

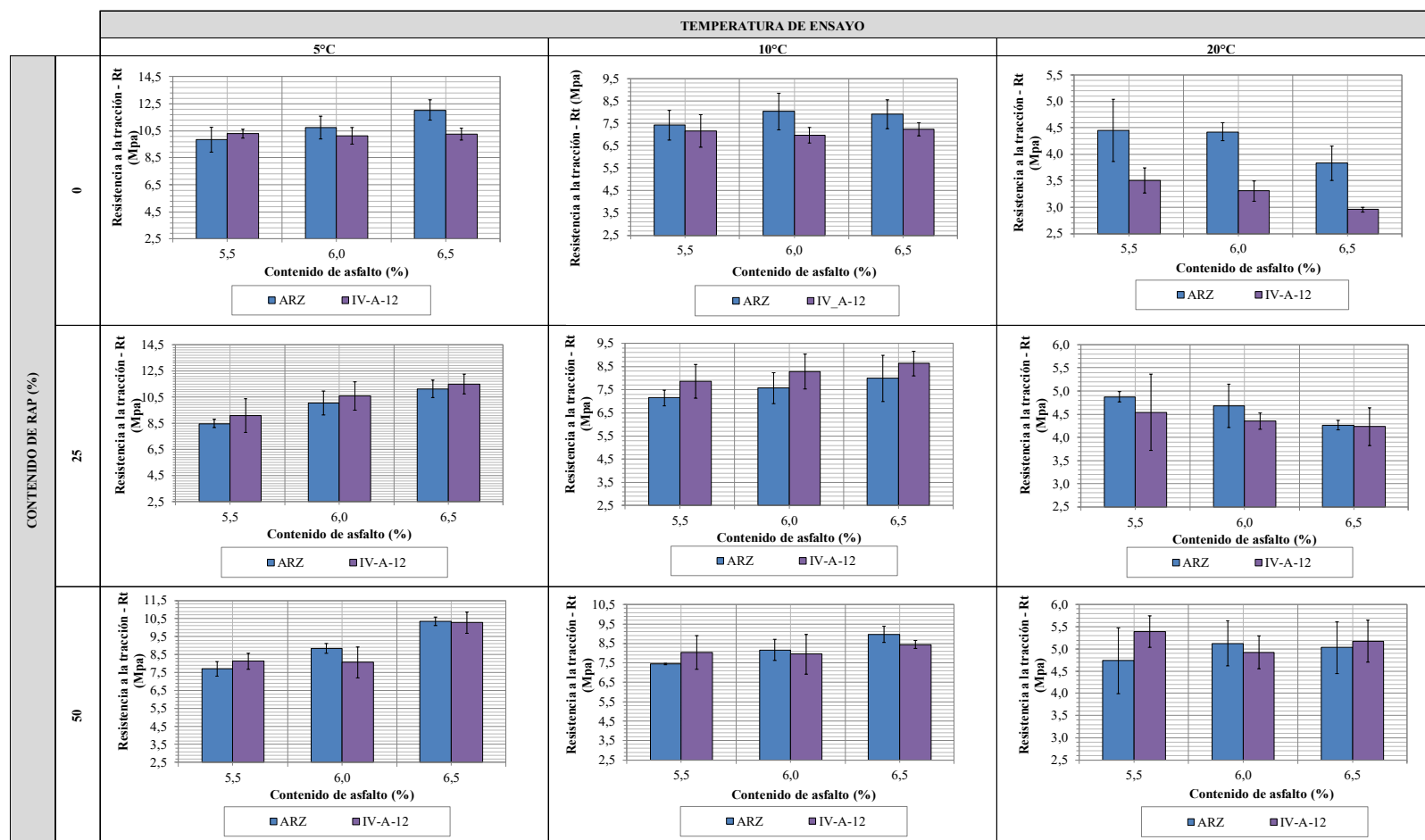


Figura 4-18: Resistencia a la tracción SCB según tipo de granulometría

- e) Análisis complementario de la resistencia a la tracción mediante el ensayo ITS para distintos tipos de asfalto.

Las mezclas utilizadas en esta parte del estudio emplean: asfaltos CA-24, CA-14 y elastomérico de marca Stylink (todos los asfaltos fueron entregados por la empresa Asfaltos Quilín), granulometría tipo IV-A-12 con adiciones de RAP de 0, 25 y 50%, contenidos de asfalto de 5,5, 6,0 y 6,5 % y temperaturas de ensayo de 5, 10 y 20 °C. El rango de contenidos de asfalto empleado comprende los óptimos de asfalto estimados en la primera parte de esta Etapa de investigación. A partir del análisis de las Figura 4-19 y Figura 4-20, se desprenden las siguientes conclusiones:

- Para la temperatura de referencia de 20 °C las máximas resistencias a la tracción se obtuvieron de la siguiente forma:
 - Con asfalto elastomérico (Stylink) para mezclas sin incorporación de RAP.
 - Con asfalto CA-24 para mezclas con 25% RAP.
 - Con asfalto CA-14 para mezclas con 50% RAP.

Debido a que el asfalto elastomérico presenta una buena ductilidad asume una buena cantidad de los esfuerzos a tracción, pero puede presentar problemas en el mezclado con el asfalto residual del RAP ocasionando reducción de su capacidad para resistir estos esfuerzos a tracción. También se debe tener en consideración que con el aumento del RAP, se incrementa la porción de asfalto residual que está envejecido y rigidizado fragilizando la mezcla.

Las mayores resistencias obtenidas con el asfalto CA-14 fueron para las mezclas con 50% RAP, lo que se podría explicar porque su baja viscosidad permite una mejor mezcla con el asfalto residual, produciendo una mezcla asfáltica de mayor ductilidad aumentando su resistencia a la tracción.

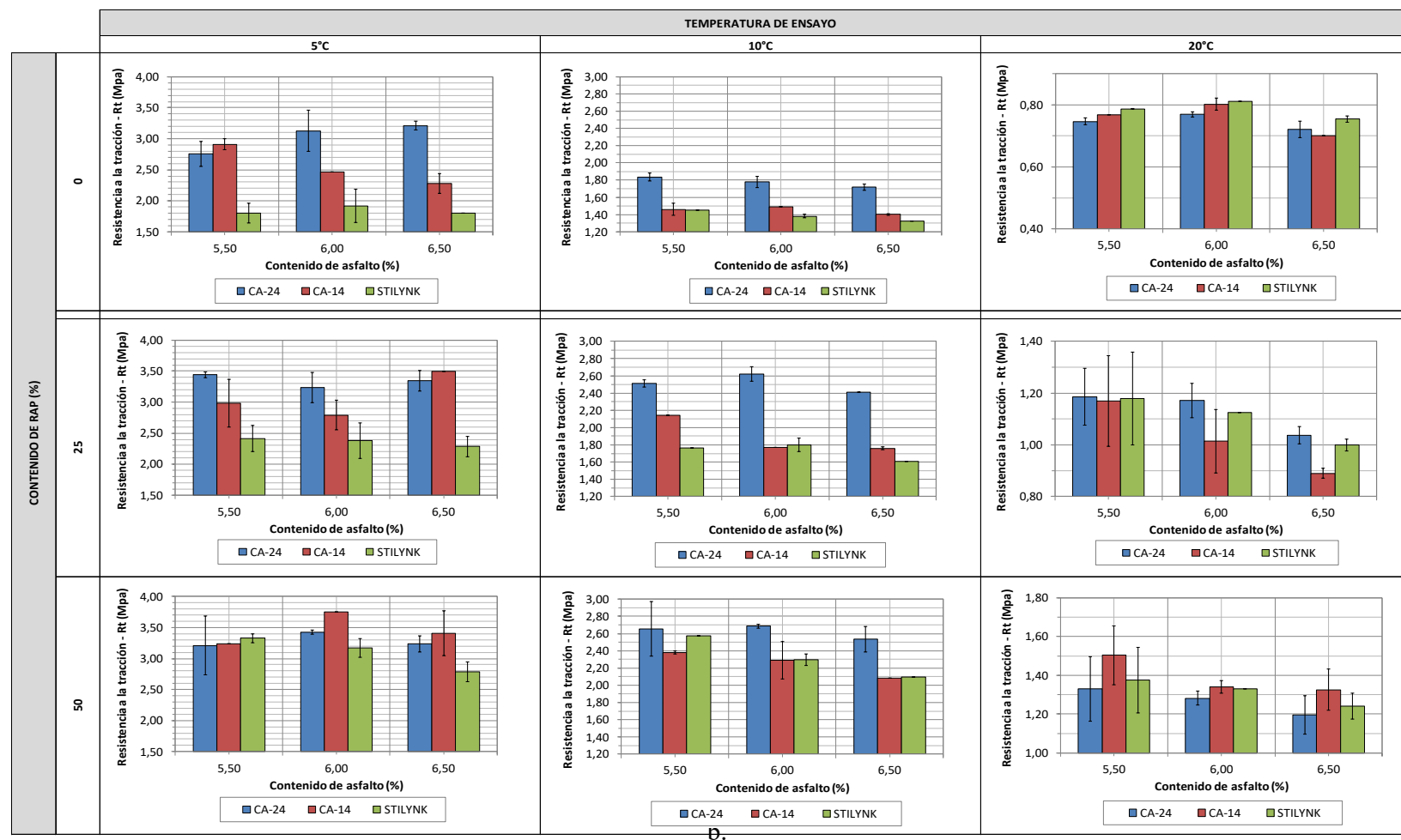


Figura 4-19: Resistencia a la tracción ITS según tipo de asfalto

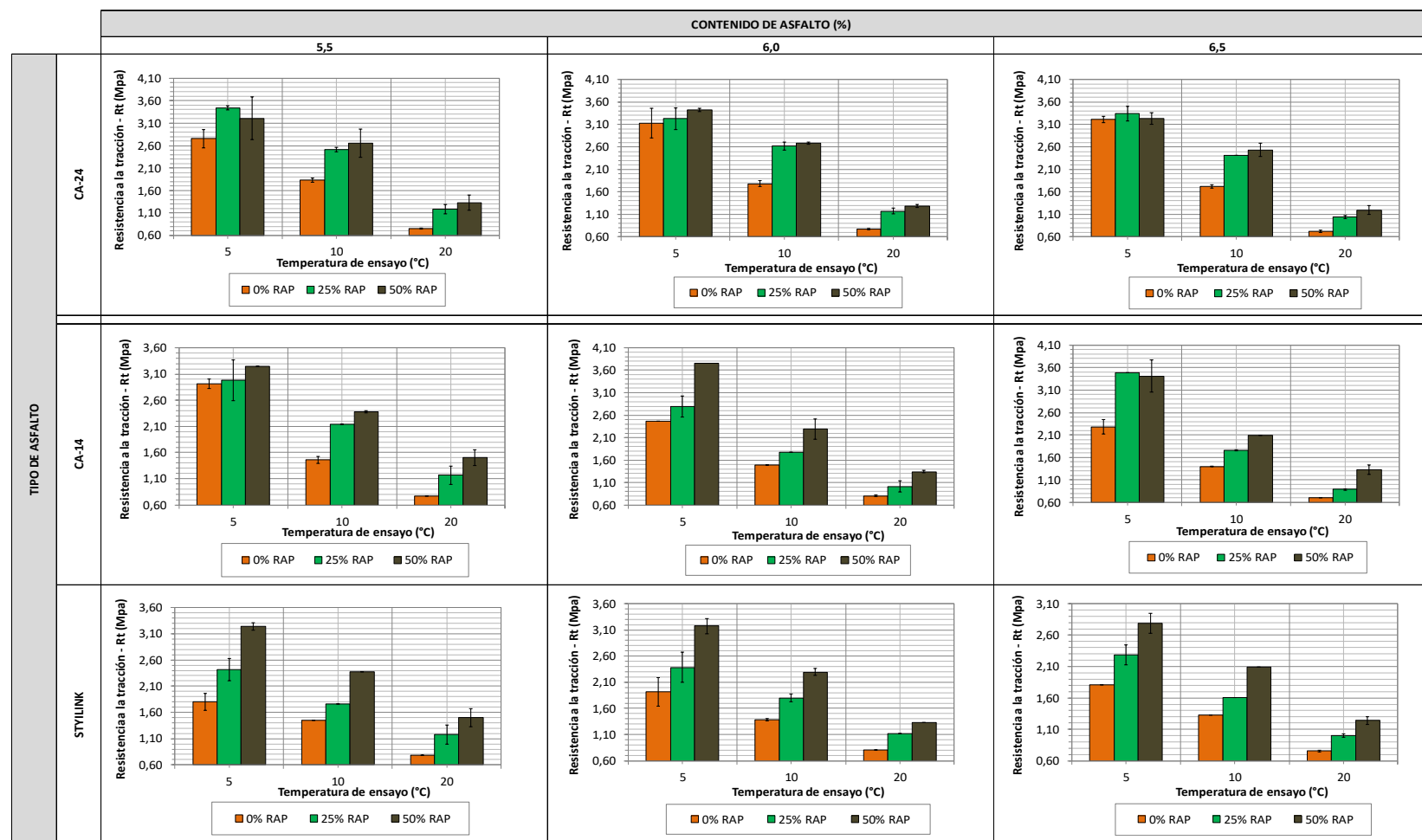


Figura 4-20: Resistencia a la tracción ITS según contenido de RAP en la mezcla

- Para temperaturas menores a 10 °C las máximas resistencias a la tracción se obtuvieron de la siguiente forma:
 - Con asfalto CA-24 para mezclas sin incorporación de RAP.
 - Con asfalto CA-24 para mezclas con 25% RAP.
 - Con asfalto CA-14 para mezclas con 50% RAP.

Se puede observar que el uso del asfalto elastomérico en mezclas con RAP reduce significativamente la resistencia a la tracción. Esto se podría explicar por la mayor dificultad para mezclarse con el asfalto residual debido a su mayor viscosidad produciendo un sistema de dos capas sobre el agregado, provocando una baja capacidad ligante y pérdida de cohesión en la mezcla y por consiguiente reduciendo su resistencia a la tracción. También, al tratarse de un asfalto con viscosidad alta, en climas con temperaturas bajas se rigidiza volviéndose frágil y poco resistente a esfuerzos de tracción.

El asfalto CA-14 está recomendado en Chile para zonas con climas fríos debido a su menor viscosidad comparado con el asfalto CA-24. Las mayores resistencias obtenidas con este asfalto para mezclas con 50% RAP se podría explicar porque su baja viscosidad permite una mejor mezcla con el asfalto residual, produciendo un asfalto con menor riesgo de fragilizarse a bajas temperaturas como ocurre con asfaltos más viscosos y duros.

- De acuerdo con los resultados obtenidos, considerando la disponibilidad de tipos de asfalto, costos y facilidad de manejo en planta, se recomienda el uso del asfalto CA-24 para mezclas hasta con un 25% RAP, mientras que el uso del asfalto tipo CA-14 para mezclas con un 50% RAP. Para contenidos de RAP intermedios deben realizarse los ensayos respectivos.

- A mayor contenido de RAP se obtienen mayores resistencias a la tracción de las mezclas. Esto se explica nuevamente empleando la Figura 4-17. A mayor contenido de RAP mayor será el aporte de asfalto envejecido (rigidizado) produciendo una mezcla más rígida.
- A mayor temperatura de ensayo menor es la resistencia a la tracción de las mezclas. Esto se explica empleando la Figura 4-21 que corresponde a investigaciones de Shell (Pell, 1978). Se observa que para un mismo tiempo de aplicación de carga (s) se obtiene una menor rigidez del asfalto (S_b) cuando se somete a una mayor temperatura. Esto se debe a la propiedad visco-elástica del asfalto.

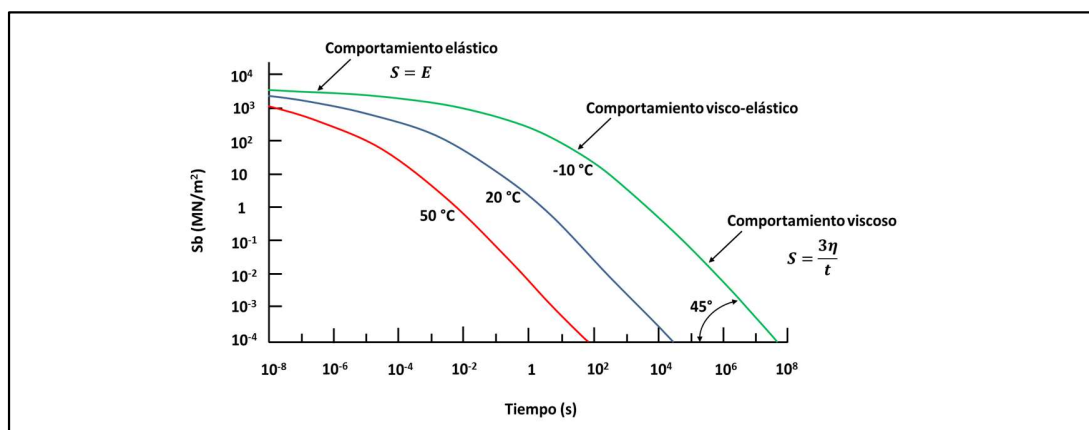


Figura 4-21: Variación de la rigidez del asfalto con el tiempo y temperatura.

Modificado de (Pell, 1978)

El Anexo F presenta todos los cálculos y resultados obtenidos en toda la Etapa 2 de la investigación.

4.3.3 Etapa 3. Diseño para cumplir (verificar) criterio de durabilidad

Las mezclas utilizadas en esta parte del estudio emplean: asfalto CA-24, granulometría tipo IV-A-12 con adiciones de RAP 0, 25, 50 y 70% y contenidos de asfalto en un rango que osciló entre 4,0 – 7,0%. Se fabricaron un total de 24 probetas (6 probetas para cada contenido de RAP), compactadas por impacto proporcionándoles 30 golpes por cada cara en vez de 75 golpes. Las 6 probetas para cada contenido de RAP diferente se dividieron en dos sub-grupos: un grupo compuesto por 3 probetas que no fueron acondicionadas y un segundo grupo conformado por las restantes 3 probetas sometidas a un acondicionamiento de 48 horas en un baño maría a 40 °C. La sensibilidad a la humedad de las mezclas se evaluó mediante la resistencia retenida (*ITSR*) o relación de resistencia a la tracción indirecta de dos subconjuntos de probetas según la norma UNE-EN 12697-12.

La Figura 4-22 y Figura 4-23 presentan los resultados de los ensayos *ITS* para cada subconjunto de probetas y las mezclas con contenidos de RAP incorporados propuestos para esta investigación, cuya relación permite calcular la resistencia retenida (*IRTS*). Las observaciones a los resultados obtenidos son las siguientes:

- Existe un contenido de asfalto que maximiza la resistencia a la tracción para las mezclas con y sin acondicionamiento. Estos óptimos pueden considerarse para el diseño de las mezclas asfálticas por dos motivos: entregan información complementaria a la Etapa 2 de investigación relacionada con la máxima resistencia a la tracción para un contenido de vacíos en la mezcla distinto al 4% establecido para la Etapa 1 y verifican el límite mínimo de *ITRS* para considerar una mezcla como no susceptible al daño por humedad o que sea durable. La Tabla 4-6 presenta los porcentajes óptimos de asfalto estimados en la Etapa 3 de investigación.

Tabla 4-6: Contenidos óptimos de asfalto para la Etapa 3

Contenido óptimo de asfalto (%)		
Etapa 3		
Contenido de RAP (%)	IRT	
	Seco	Húmedo
0	4,9	5,3
25	5,4	5,9
50	6,0	6,2
70	5,9	6,0

- La resistencia retenida (*IRT*) para todas las mezclas con y sin RAP para el contenido óptimo de asfalto fue superior al 80%, valor considerado como límite inferior para el control de la susceptibilidad a la humedad de mezclas asfálticas. De esta manera se verificó el criterio de durabilidad de las mezclas estudiadas.
- Al aumentar el contenido de asfalto en la mezcla, los valores de *IRT* para los dos subconjuntos de probetas se acercan en magnitud, indicando una menor susceptibilidad a la humedad debido a que la mezcla se vuelve más impermeable gracias al asfalto. Se produce una mejor envuelta de los agregados generando un mayor espesor de película de asfalto y una mayor cohesión de la mezcla.

El Anexo F presenta los resultados de laboratorio de esta etapa de la investigación.

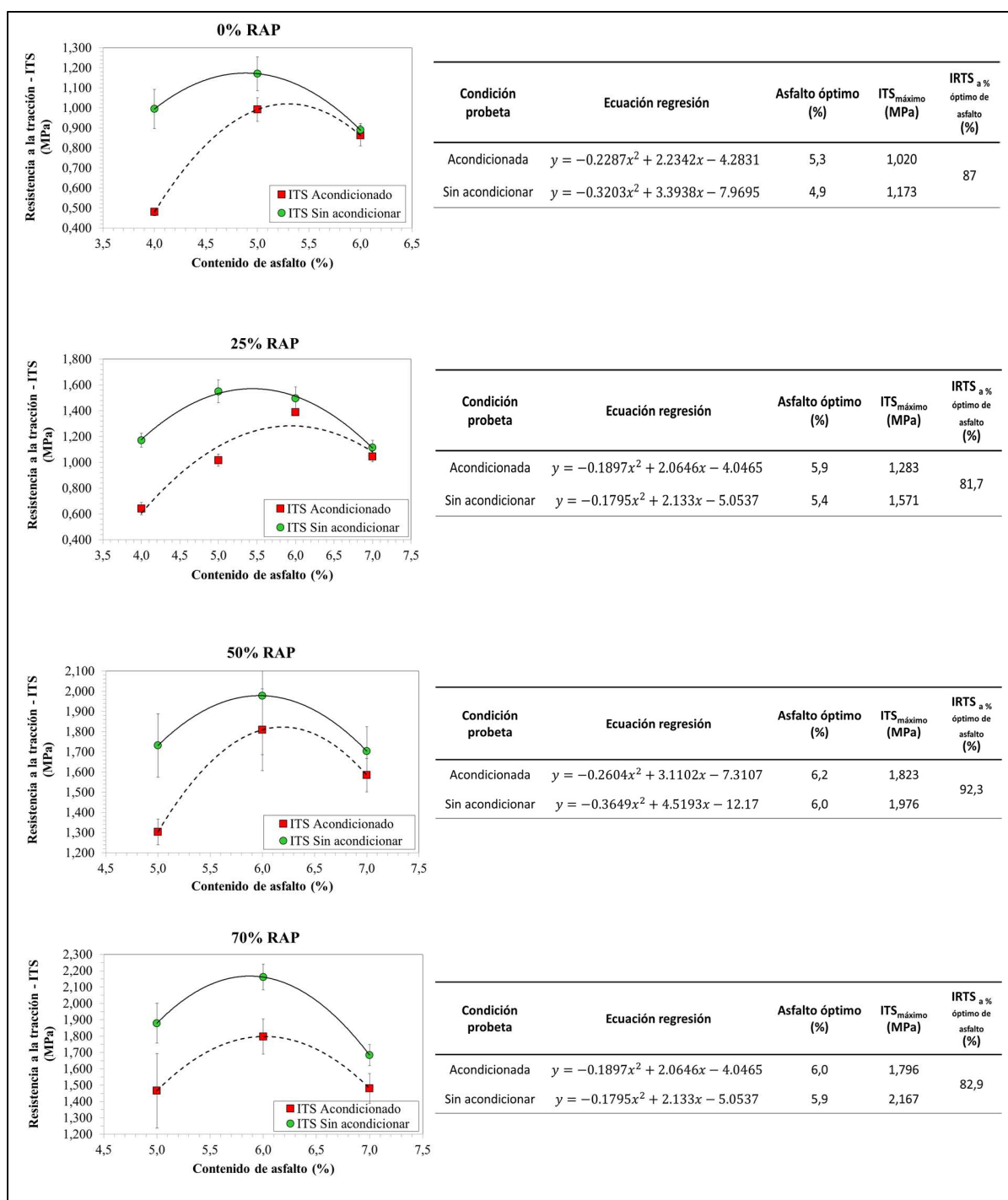


Figura 4-22: Relación de la resistencia a la tracción indirecta mediante el ensayo de sensibilidad a la humedad y contenidos óptimos de asfalto

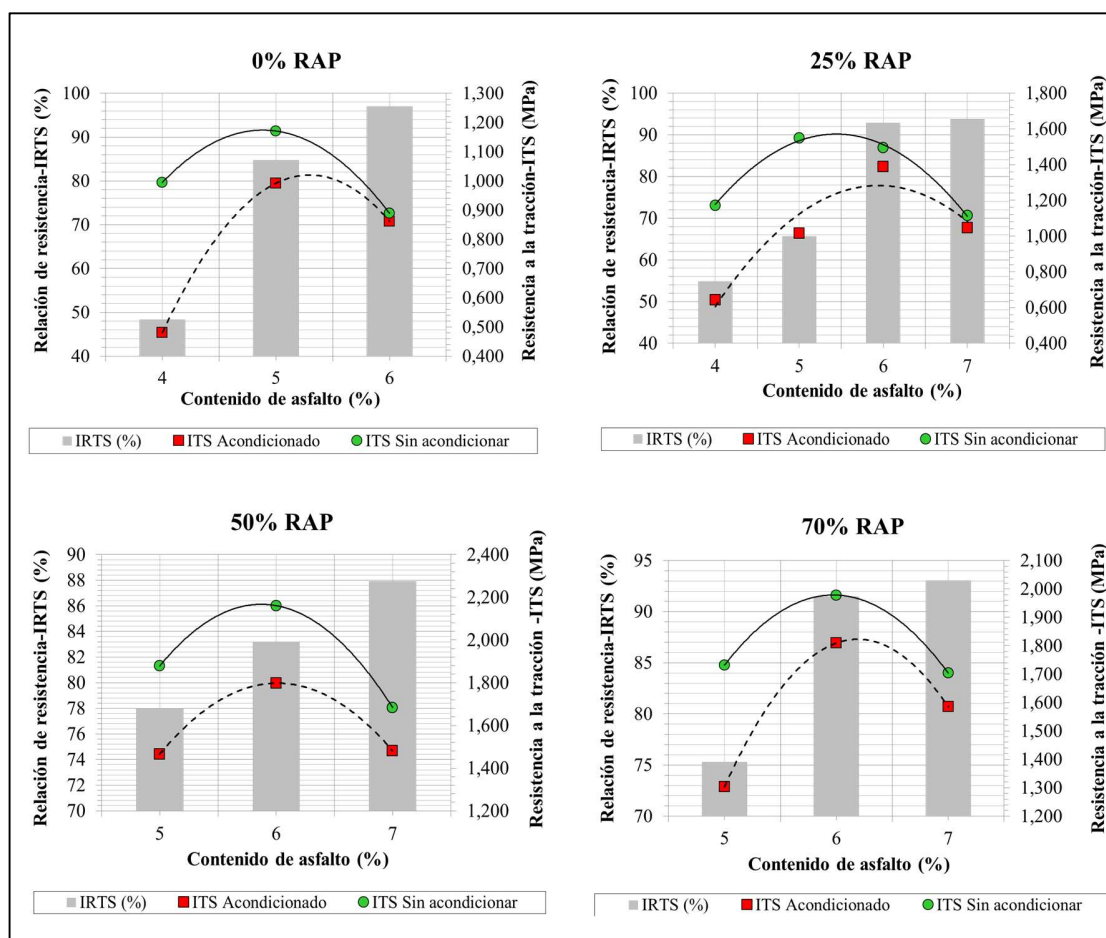


Figura 4-23: Relación de resistencia a la tracción indirecta de mezclas asfálticas con RAP

4.3.4 Etapa 4. Fatiga y módulo

a) Fatiga de las mezclas asfálticas

Las mezclas utilizadas en esta parte del estudio emplean: asfalto CA-24 y granulometría tipo IV-A-12 con adiciones de RAP de 0, 25 y 50%. Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio Nacional de Vialidad (LNV). La fabricación de los especímenes de ensayo requirieron de dos procesos: fabricación de bloques en un

compactador de rodillo, los cuales fueron cortados en dimensiones establecidas y el desarrollo del ensayo de fatiga propiamente tal.

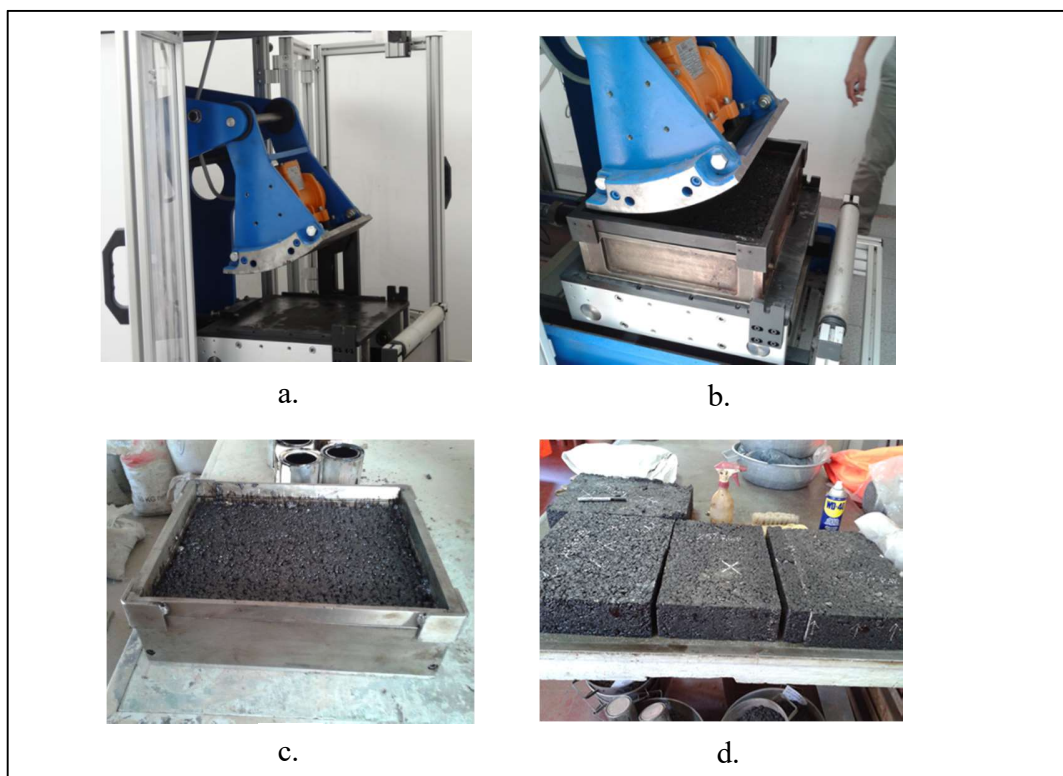


Figura 4-24: Elaboración de muestras para ensayo a fatiga. a. Equipo compactador de rodillo. b. Compactación de espécimen de mezcla asfáltica c. Muestra compactada sin desmoldar d. Especímenes en forma de bloque desmoldados

La Figura 4-24 muestra el proceso de fabricación las muestras de ensayo en forma de bloque mediante el compactador de rodillo. Estos bloques tienen dimensiones de 375 mm x 125 mm x 90 mm, los cuales fueron cortados posteriormente para obtener las viguetas rectangulares con dimensiones 50 mm x 63 mm x 385 mm de longitud para el ensayo a fatiga. Se controlaron las propiedades volumétricas de las mezclas cuidando que los vacíos de aire estuvieran en un rango de $7\% \pm 1$.

La resistencia a la fatiga de las mezclas fue estimada mediante el ensayo de la viga de cuatro puntos de acuerdo con la norma AASHTO T-321/07 “Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending”. Se aplicó una carga constante de tipo semi-sinusoidal a las vigas de mezcla asfáltica con un número de repeticiones de carga hasta obtener el estado de falla de la viga. Esta norma define la falla por fatiga como la reducción del 50% de la rigidez inicial, la cual está relacionada con las microfisuras que aparecen en la mezcla asfáltica. El ensayo fue realizado a niveles de deformaciones unitarias constantes de 100, 200, 300, 400, 500 y 600 μm , una frecuencia de 10 Hz y una temperatura de ensayo de 20 °C. La Figura 4-24 y Figura 4-25 presentan el acondicionamiento de las viguetas y el montaje del ensayo.

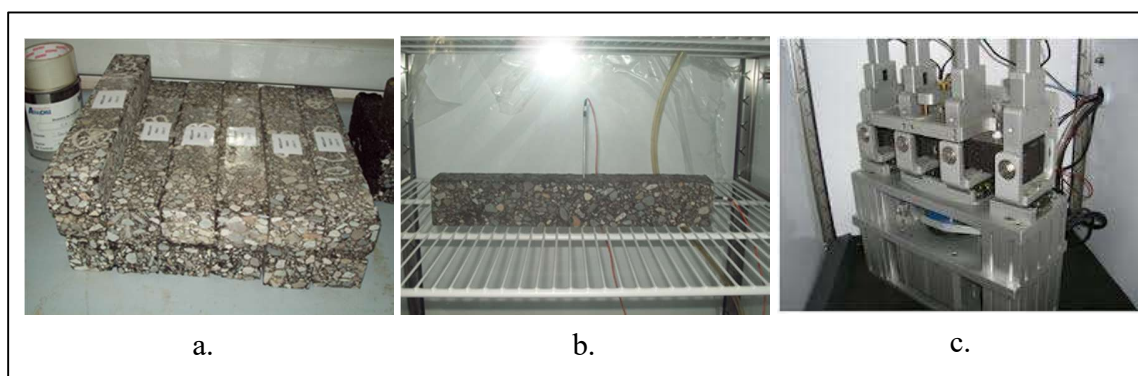


Figura 4-25: Ensayo de fatiga de viga de cuatro puntos. a. Vigas obtenidas del corte de los especímenes en forma de bloque. b. Acondicionamiento de las vigas de ensayo. c. Disposición del ensayo de fatiga de viga de cuatro puntos.

La Figura 4-26 presenta las curvas de fatiga obtenidas. Los resultados muestran que la mezcla con un 50% RAP presentó la resistencia a la fatiga más baja, mientras que las mezclas con el 0 y 25% RAP mostraron un comportamiento similar teniendo la del 25% una vida a la fatiga ligeramente mayor.

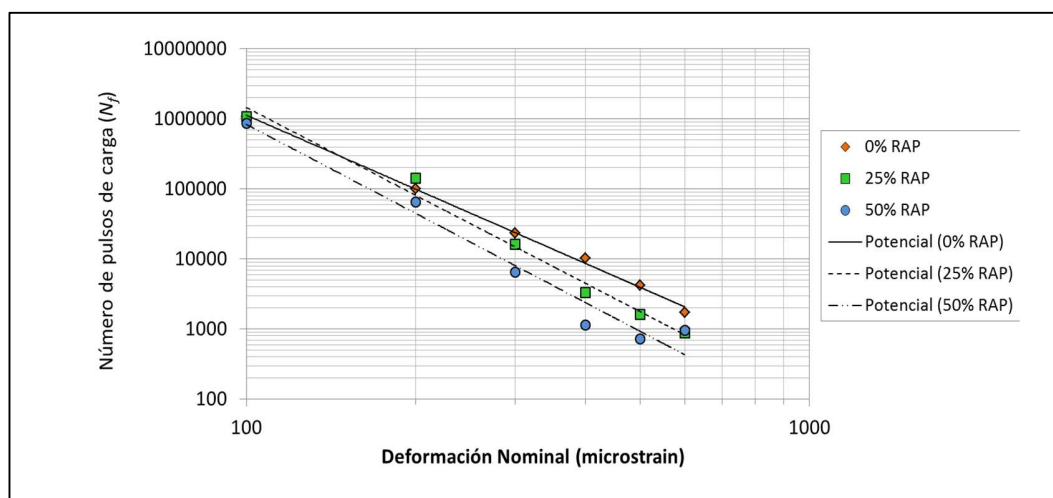


Figura 4-26: Efecto del contenido de RAP sobre la respuesta de deformación por tensión bajo pulsos de cargas repetitiva

Si se establece la vida a la fatiga de la mezcla con un 0% RAP como patrón de comparación, el análisis para un nivel de deformación de $100 \mu\epsilon$ indica que la mezcla con un 25% RAP tiene un ligero aumento del 0.5% de vida a la fatiga mientras que la mezcla con el 50% RAP tuvo una disminución de aproximadamente el 23% de vida a la fatiga, considerado un valor alto (Tabla 4-7). No obstante, a medida que se aumenta el nivel de deformación del ensayo la mezcla patrón presenta un mejor comportamiento a la fatiga que las otras dos mezclas de estudio.

Tabla 4-7: Resultados del análisis de regresión de la vida a fatiga

Mezcla	Coeficientes		R^2	Ciclos a $100 \mu\epsilon$
	k_1 (10^{14})	k_2		
0% RAP	0.1214	-3.515	0.9973	1074430
25% RAP	3.159	-4.168	0.9865	1080312
50% RAP	2.357	-4.225	0.9646	872940

i) Relación k_1 - k_2

Los valores de k_1 y k_2 del ensayo de fatiga a flexión son altamente correlacionables. Se utilizó el promedio móvil para calcular los valores de k_1 y k_2 y así tener una mayor cantidad de puntos a considerar (cuatro parejas de puntos para las mezclas con 0 y 25% RAP y tres parejas de puntos para la mezcla con un 50% RAP). La Figura 4-27 presenta la relación entre las constantes k_1 vs k_2 en una escala semi-logarítmica para las mezclas de estudio, en la cual se observa que existe una correlación de tipo lineal a pesar de que las mezclas contengan contenidos de RAP diferentes.

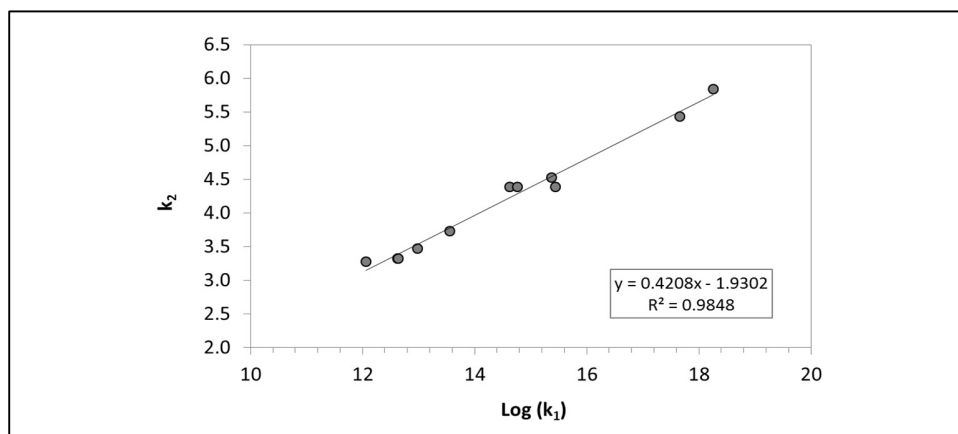


Figura 4-27: Relación k_1 vs k_2 para todas las mezclas de estudio

La ecuación de correlación obtenida es la siguiente:

$$k_2 = 0,4208 \times \log(k_1) - 1,9302 \quad (4.7)$$

La que también se puede escribir como:

$$N = k_1 \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{[0,4208 \times \log(k_1) - 1,9302]} \quad (4.8)$$

La determinación del coeficiente de la ecuación 4.8 solamente requiere un par de valores (N , ε_t). Este par de valores corresponden a una serie de ensayo de fatiga a un nivel único de deformación. Se prefiere un nivel alto de deformación ya que toma menos tiempo de ejecución del ensayo ($> 500 \mu\epsilon$).

b) Evaluación del módulo de las mezclas

Las mezclas utilizadas en esta parte del estudio emplean: asfaltos CA-24, CA-14 y Stylink, granulometría tipo IV-A-12 con adiciones de RAP de 0, 25 y 50%, contenidos de asfalto de 5,5, 6,0 y 6,5% y temperaturas de ensayo de 5, 20 y 35 °C.

Los resultados expuestos en esta parte del estudio corresponden al análisis de las propiedades de módulo dinámico (MD) y el Índice de Rigidez a la Tracción (IRT). Las secciones subsiguientes presentan las observaciones consideradas más importantes respecto al MD e IRT de las mezclas y la validación de la correlación entre estas dos propiedades.

i) Módulo dinámico e Índice de Resistencia a la Tracción

Para estimar el MD de las mezclas asfálticas se desarrolló el procedimiento recomendado por AASHTO TP 62-03, utilizando una máquina tipo Nottingham Asphalt Tester (NAT), la cual está equipada con una cámara de temperatura y una celda de presión. Se aplicó una carga de compresión de forma semi sinusoidal continua con un período de reposo de 0.1 segundos. Para el ensayo se utilizó una frecuencia de 10 Hz y tres temperaturas (5, 20, 35 °C). Para la

medición de los datos, se montaron sobre cada lado de la probeta un medidor de deformación axial (LVDT-Linear Variable Differential Transducers). El ensayo se ejecutó dentro del rango lineal viscoelástico del material controlando la deformación entre 85 a 115 micro strains.

El *IRT* de las mezclas fue obtenido del ensayo ITS realizado en la Etapa 2 de la presente investigación.

El Anexo F contiene todo el trabajo de laboratorio realizado y la totalidad de los resultados obtenidos. No obstante, las observaciones más importantes consideradas respecto a la rigidez de la mezcla son:

- Las mezclas con un 50% RAP presentaron un mayor módulo comparado con las del 25% y 0% RAP para todas las temperaturas de ensayo y todos los tipos de asfalto. Esto se explica porque el asfalto residual presente en el RAP está envejecido y al tener un mayor aporte en la mezcla, la rigidiza.
- Los valores de módulos se hacen más homogéneos a medida que la temperatura de ensayo disminuye. Esta tendencia se cumple para todas las mezclas estudiadas.

ii) Validación de la correlación MD – IRT

La Figura 4-28 presenta 81 puntos experimentales que indican la relación MD-IRT. Las mezclas ensayadas en esta parte del trabajo incluyen: los tres contenidos de RAP (0, 25 y 50%), las tres temperaturas de ensayo (5, 20 y 35 °C) y tres tipos de asfalto (CA-24, CA-14 y Stylink). El estadístico R^2 estimado de 0.86, indica una buena correlación entre las variables y se considera bueno para el propósito de la investigación. Esta tendencia es similar en los análisis

específicos para cada contenido de RAP y tipo de asfalto, información que se presenta en el Anexo F. La correlación encontrada indica que es promisorio el uso de la propiedad del IRT de una mezcla asfáltica con y sin RAP obtenida a través de un ensayo estático para estimar el módulo dinámico de la misma. Esto trae consigo las siguientes ventajas: la estimación del módulo se puede hacer mediante un ensayo más simple y con configuración estática, se puede utilizar en proyectos que no requieran de un nivel alto de precisión y permite optimizar los costos de laboratorio reduciendo la necesidad de contar con un equipo para medir el módulo dinámico, el cual es costoso y delicado.

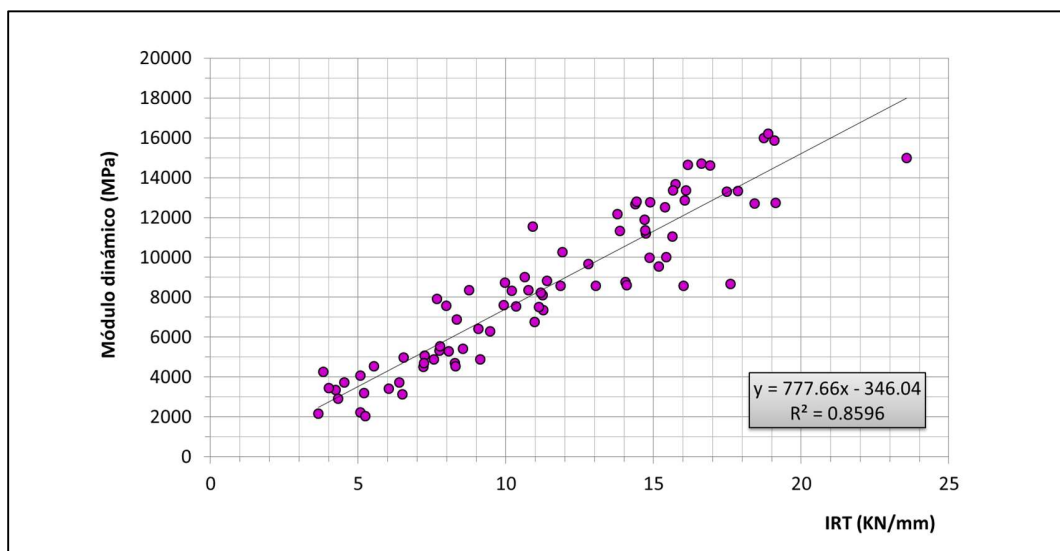


Figura 4-28: Correlación Módulo dinámico vs IRT para todos las variables de estudio

De acuerdo con los resultados obtenidos para la evaluación de la fatiga y el módulo de las mezclas asfálticas, se presentan las siguientes conclusiones:

- Como era de esperarse, todas las mezclas mostraron un módulo dinámico más alto a la temperatura más baja de ensayo (5 °C) que a temperaturas más altas de ensayo (35 °C). También se pudo constatar que las mezclas con un mayor

contenido de RAP presentaron un mayor módulo dinámico, lo que se explica por el envejecimiento del asfalto residual del RAP que rigidiza la mezcla.

- El módulo dinámico por sí solo no es un buen indicador del desempeño de una mezcla asfáltica. Las mezclas con 50% RAP presentaron un módulo más alto pero una menor vida a la fatiga, comparadas con las mezclas con 0 y 25% RAP. Con el incremento de RAP en la mezcla, el módulo dinámico también aumenta; no obstante, la vida a la fatiga se reduce produciendo mezclas que para un mismo número de repeticiones de carga soporta menor nivel de deformación.
- El módulo de las mezclas se considera importante cuando los bloques de asfalto sean colocados encima de una capa estabilizada muy fuerte o sobre hormigón. En estas condiciones el módulo de la mezcla medido en laboratorio es un buen indicador del módulo de la capa que se estima en terreno.

4.3.5 Etapa 5. Empleo del Polígono de Vacíos para verificar el contenido de asfalto en función de las propiedades volumétricas

Mediante esta técnica se pueden mostrar gráfica y analíticamente los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica representados por el contenido de asfalto (P_b) y la densidad compactada (G_{mb}), por lo que se puede determinar la densidad de la mezcla compactada (G_{mb}) de acuerdo con sus propiedades volumétricas: vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos llenos con asfalto (VFA) y las constantes de la gravedad específica total del agregado combinado – agregados vírgenes y agregados del RAP - ($G_{sb\ comb}$), la gravedad específica efectiva del agregado combinado ($G_{se\ comb}$) y la gravedad específica del asfalto (G_b).

La validación del Polígono de Vacíos requirió de la construcción de una hoja Excel programable para construir los gráficos de los parámetros volumétricos de las mezclas

requeridos y poder estimar los contenidos de asfalto óptimos. Estos contenidos de asfalto fueron comparados con los obtenidos mediante el diseño Marshall en la Etapa 1 de esta investigación. La validación del polígono de vacíos requirió del siguiente procedimiento:

- Estimación de la Gravedad Específica Total del RAP (G_{sb}^{RAP}). En este caso, se tienen en cuenta los tres valores obtenidos para cada uno de los métodos discutidos.
- Introducción de datos a la hoja Excel programada con las propiedades volumétricas requeridas y el G_{sb}^{RAP} . Este procedimiento se repitió para cada una de los G_{sb}^{RAP} , correspondiente a cada uno de los métodos de cálculo.
- Estimación del contenido óptimo de asfalto a través del polígono de vacíos según el G_{sb}^{RAP} utilizado.
- Comparación de estos contenidos de asfalto con los estimados mediante el método Marshall.

Los resultados muestran que los contenidos óptimos de asfalto calculados mediante la hoja Excel programada para el Polígono de Vacíos son similares a los estimados mediante un diseño Marshall si se emplea la metodología de la sustitución para el cálculo del G_{sb}^{RAP} . Esto presenta facilidades para la estimación previa del contenido de asfalto ya que dicho método solamente requiere del cálculo de la Gravedad Específica Efectiva (G_{se}^{RAP}) a través de la medición de la Gravedad Máxima Teórica (G_{mm}^{RAP}) en laboratorio, lo cual es simple y rápido de ejecutar. En el caso de contar con la propiedad de absorción de asfalto de los agregados, aplicar la metodología del retro-cálculo también arroja valores cercanos a los del diseño Marshall, pero se van alejando cuando se incorpora más del 50% de RAP en la nueva mezcla.

La Figura 4-29 presenta los contenidos óptimos de asfalto determinados mediante la herramienta del polígono de vacíos y los diseños Marshall. El Anexo F presenta los datos de entrada y salida para los cálculos respectivos.

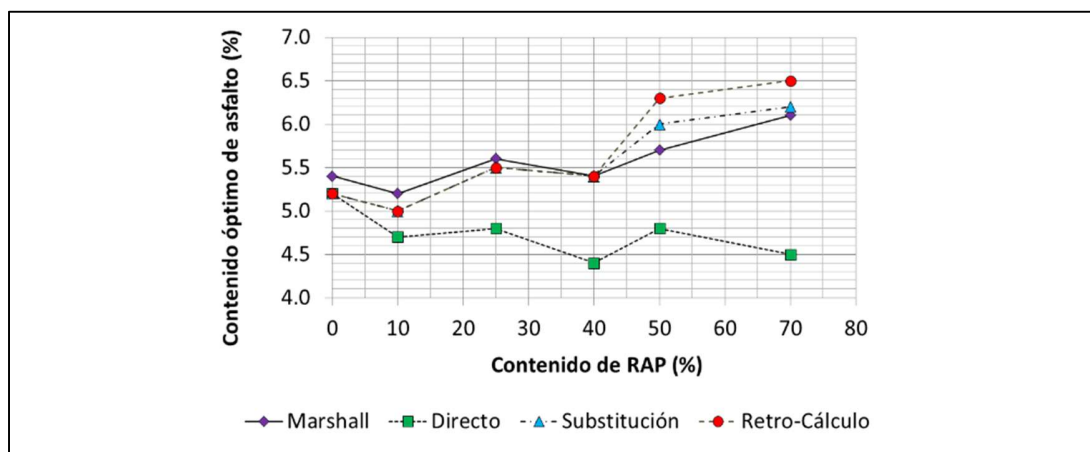


Figura 4-29: Comparación contenidos óptimos de asfalto para $V_a = 4\%$

4.4 Estimación del contenido óptimo de asfalto y contenido de RAP para el diseño de mezclas para bloques de asfalto

Se consideró evaluar el diseño de las mezclas para bloque en dos partes: estimación del contenido óptimo de asfalto y estimación del contenido de RAP a incorporar a la mezcla.

a) Estimación del contenido óptimo de asfalto

El contenido óptimo de asfalto para la fabricación de las mezclas asfálticas para bloques corresponde al promedio de los porcentajes óptimos estimados en las Etapas 1, 2 y 3 de la investigación que cumplen con los criterios de diseño propuestos: vacíos

de aire, máxima resistencia a la tracción SCB y durabilidad. La Figura 4-30 presenta el esquema resumen para determinar este contenido óptimo de asfalto.

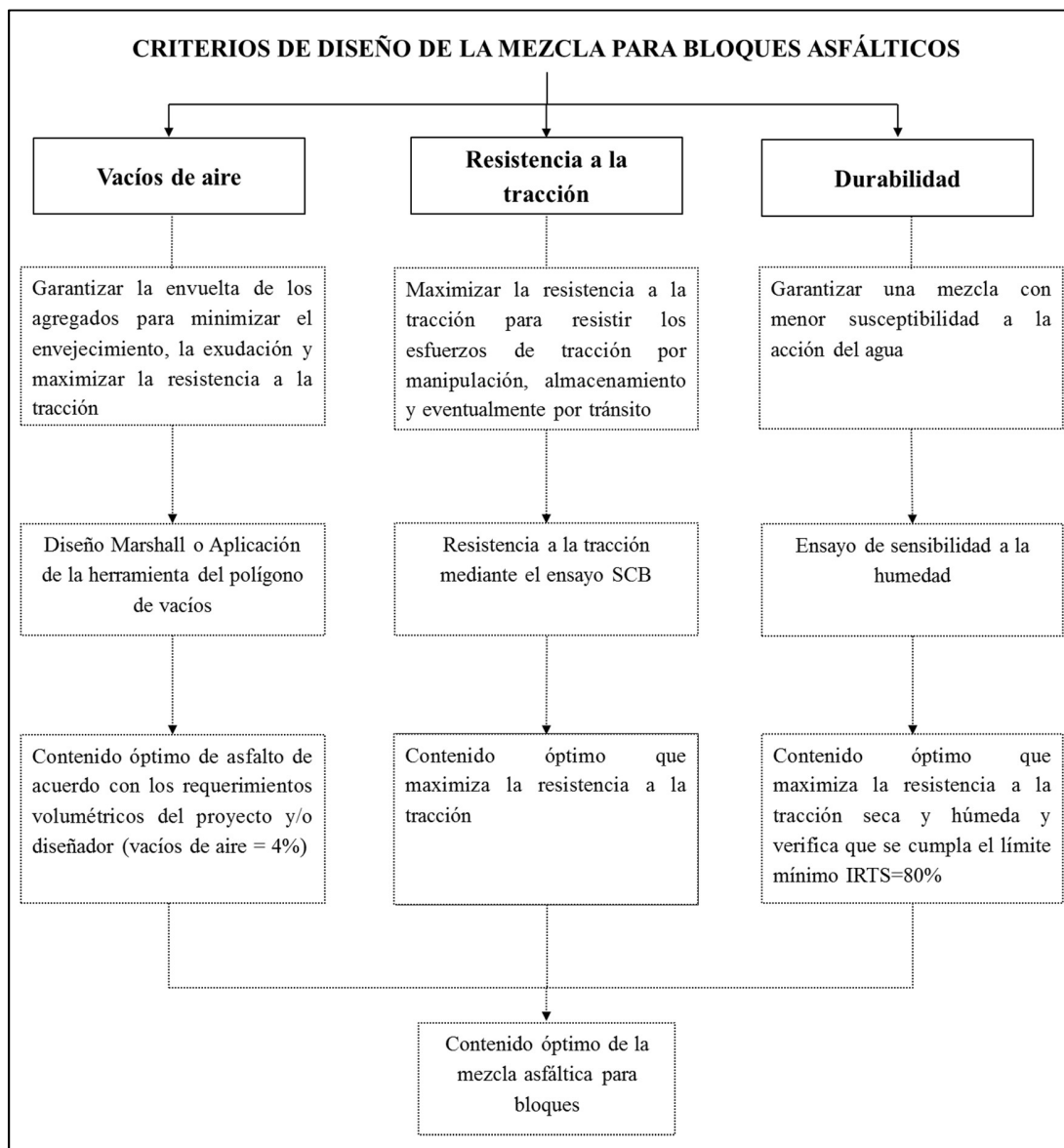


Figura 4-30: Esquema para la elección del contenido óptimo de asfalto para la mezcla de bloques asfálticos

Matemáticamente, el óptimo de asfalto se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Contenido óptimo de asfalto (\%)} = \frac{(CA V_a + CA Rt_{SCB} + CA Rt_{sa} + CA Rt_a)}{4} \quad (4.4)$$

Donde;

$CA V_a$ (%) = Contenido de asfalto para las propiedades vacíos de aire en la mezcla de un 4%.

$CA Rt_{SCB}$ (%) = Contenido de asfalto que maximiza la resistencia a la tracción mediante el ensayo SCB.

$CA Rt_{sa}$ (%) = Contenido de asfalto que maximiza la resistencia a la tracción para las mezclas sin acondicionar (secas) en el ensayo de sensibilidad a la humedad.

$CA Rt_a$ (%) = Contenido de asfalto que maximiza la resistencia a la tracción para las mezclas acondicionadas (húmedas) en el ensayo de sensibilidad a la humedad.

La Tabla 4-8 presenta los contenidos óptimos de asfalto para las mezclas asfálticas con y sin RAP para bloques estimados en esta investigación. Las tres etapas de investigación que dan origen a la cantidad óptima de asfalto promedio entregan valores considerados cercanos y consistentes y prácticamente están comprendidos en el rango de tolerancia permitido para el diseño de mezclas asfálticas indicado como el valor promedio $\pm 0,3\%$. No obstante, los valores promedio son prácticamente los mismos a los estimados en la Etapa 1 de la investigación, ratificando la importancia de las propiedades volumétricas para un buen desempeño de la mezcla, especialmente los vacíos de aire.

Tabla 4-8: Contenidos óptimos de asfalto para mezclas para bloques de asfalto

	Contenido óptimo de asfalto (%)				Promedio
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3		
Contenido de RAP (%)	Marshall	SCB	IRTS		
			Seco	Húmedo	
0	5,4	5,8	4,9	5,3	5,4
25	5,6	5,7	5,4	5,9	5,7
50	5,7	5,8	6,0	6,2	5,9

La Figura 4-31 presenta de forma gráfica los contenidos óptimo de asfalto promedio calculado para las Etapas 1, 2 y 3 de este trabajo y el contenido de RAP incorporado a la mezcla. Se presentan las barras de error estándar para un 95% de confiabilidad.

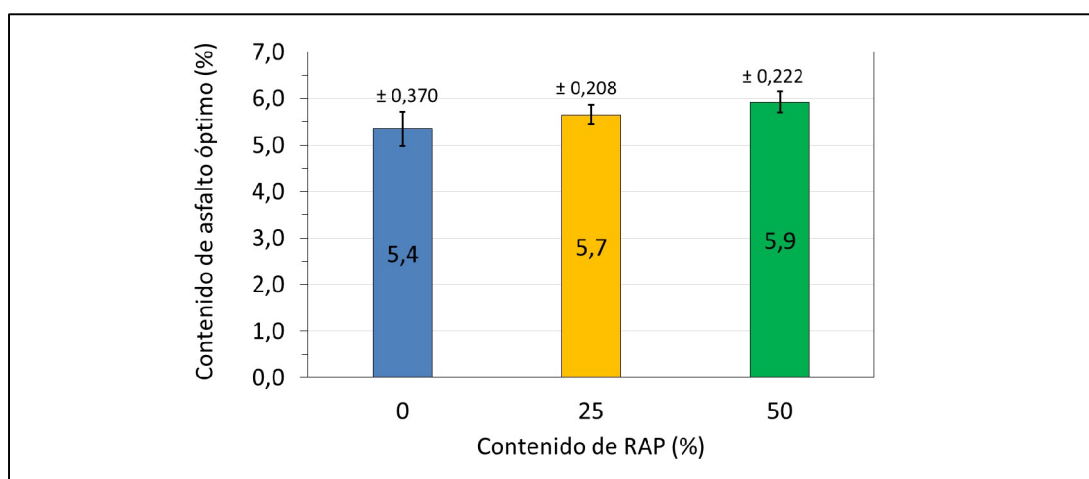


Figura 4-31: Contenido óptimo de asfalto según porcentaje de RAP en la mezcla

Su análisis permite las siguientes consideraciones:

- Existe un aumento que oscila entre un 0,2% a 0,3% en el contenido óptimo de asfalto por cada incremento de un 25% RAP dentro del rango experimental investigado. Esto refuerza la idea sobre el aumento en el contenido de asfalto óptimo debido a la existencia de caras libres de asfalto en los agregados del RAP

a causa del proceso de fresado en terreno y del re-procesado en planta mediante chancado.

- El error estándar del contenido óptimo de asfalto para cada una de las mezclas estudiadas presenta prácticamente la misma magnitud que el porcentaje permitido en obra para la fabricación de mezclas en caliente de $\pm 0,3\%$.

b) Determinación del contenido de RAP en la mezcla

El contenido de RAP factible de adicionar a la mezcla asfáltica se analizó teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- A medida que se aumenta el contenido de RAP, se incrementa la propiedad de resistencia a la tracción de las mezclas. En este contexto, se podría adicionar hasta un 70% RAP que representa el límite máximo estudiado. Sin embargo, en el Capítulo 3 de esta investigación se explicó sobre el aumento considerable en la temperatura requerida para el calentamiento de los agregados a medida que se aumenta la proporción de RAP en la mezcla, por lo que se podría ocasionar un mayor consumo energético, mayores emisiones de gases de efecto invernadero y un envejecimiento acelerado del asfalto residual presente en el RAP. Como valor de referencia se puede citar que al adicionar un 50% RAP, el incremento de temperatura para calentar los agregados vírgenes es de 100 °C. Estas mezclas se pueden fabricar según la tecnología disponible.
- Las plantas de producción de mezclas asfálticas que existen actualmente en Chile están en capacidad de producir mezclas recicladas con un máximo de adición del 30% RAP sin afectar su productividad. Este valor por sí mismo es un condicionante para elaborar mezclas con RAP. No obstante, esta situación

podría cambiar en un futuro cuando existan normas en el país que permitan el uso del RAP y se actualicen o mejoren las plantas de producción de mezclas.

- En esta investigación no se analizó en terreno el desempeño funcional del pavimento. No obstante, estudios realizados en laboratorio a mezclas asfálticas recicladas con distintos contenidos de RAP, mostraron una reducción gradual de la resistencia al deslizamiento con el incremento del RAP, pero que era aceptable para mezclas que contenían hasta un 25% RAP (McDaniel, Kowalski, & Shah, 2012).

Al analizar en conjunto las consideraciones descritas, se puede establecer que la máxima cantidad de RAP que es factible adicionar actualmente a una nueva mezcla asfáltica en caliente en Chile es del 25%, considerando que en esta investigación solamente se utilizaron los factoriales de 0%, 25% y 50% de RAP.

5. DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN PAVIMENTO ARTICULADO DE BLOQUES ASFÁLTICO

En el presente capítulo se exponen las siguientes etapas del programa de investigación: diseño de las dimensiones del bloque de asfalto, construcción de un modelo físico experimental, análisis deflectométrico para el retro-cálculo del módulo de las capas del pavimento, propuesta del diseño estructural y análisis comparativo entre el diseño estructural de un pavimento flexible tradicional y un pavimento de bloques asfálticos.

5.1 Programa y resultados experimentales para el diseño de las dimensiones del bloque

Para optimizar el diseño del bloque de asfalto y a su vez el programa experimental se plantearon los siguientes criterios:

- a. Utilizar un diseño de espesor mínimo de 5 cm, considerando que éste es el espesor mínimo recomendado para una carpeta asfáltica. En este caso se toma en cuenta uno de los objetivos originales del proyecto el cual busca una alternativa industrializada para reemplazar los pavimentos económicos de asfalto utilizados en pavimentación urbana o pavimentos de tránsito liviano.

Eventualmente se puede considerar un diseño de mayor espesor, pero la condición crítica de diseño está dada para un espesor mínimo recomendado para pavimentos asfálticos. También, en la práctica es posible encontrar diseño de pavimentos de asfalto con espesores menores a 5 cm, pero se establece a priori que no se estudiarán espesores menores de diseño. A lo largo del desarrollo del estudio, ésta última consideración quedará respaldada.

- b. El segundo criterio que se plantea se refiere a la forma del bloque. Dado que la mezcla asfáltica no se moldea de la misma forma que la de un hormigón, se considera que la forma del bloque necesariamente será cuadrada o rectangular en donde la determinación de las dimensiones óptimas quedará determinada por una serie de factores que son parte del programa experimental.
- c. Las dimensiones planas del bloque se determinarán sobre la base de los siguientes factores:
 - Impronta de carga de la rueda neumática y estado de tensiones de la unidad de bloque.
 - Constructabilidad.
 - Distribución de esfuerzos bajo la capa de rodado.

5.1.1 Impronta de carga

Se consideró que el tamaño del bloque queda limitado por la dimensión de la impronta de la rueda de carga. La Figura 5-1 presenta las dos formas de improntas del neumático sobre la superficie del bloque consideradas en este trabajo: circular y combinada (un rectángulo con dos semi-círculos). La dimensión circular se asumió por su simplicidad en los cálculos y la forma ovalada fue sugerida por Yoder & Witezak (1974) por parecerse más a la impronta real de un neumático sobre el pavimento, lo cual se ha comprobado en muchas investigaciones (Moazani, Muniandy, Hamid, & Yusoff, 2011).

Para el cálculo de esfuerzos de las improntas se empleó una carga de 20 kN actuando sobre una rueda neumática de un eje estándar (simple de rueda doble) y una presión de inflado del neumático de 800 kPa. Esta presión de inflado oscila entre los 650 kPa

a los 850 kPa para neumáticos típicos actuales de camiones como por ejemplo los modelos 445/50R22.5, 455/55R22.5 y/o 295/75R22.5.

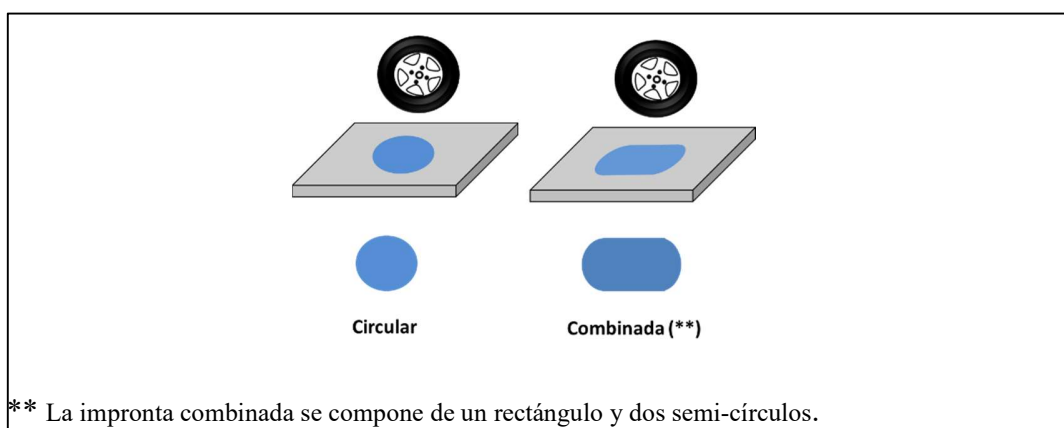


Figura 5-1: Improntas típicas empleadas para el diseño de pavimentos

a) Impronta circular

El radio de la impronta circular se calcula de la siguiente manera:

$$r = \sqrt{\frac{P}{\pi \times q}} \quad (5.1)$$

Donde:

r = radio de la impronta circular (m)

P = carga por rueda (kN)

q = presión de inflado del neumático (kPa)

El radio promedio de la impronta de un neumático cargado es de 9 cm ($\Phi=18$ cm), por lo cual según se posicione la impronta sobre el bloque y según el tamaño del bloque éste podrá estar sometido a fuerzas de flexo-tracción mayor o menor.

La Figura 5-2 presenta un esquema que explica éste concepto.

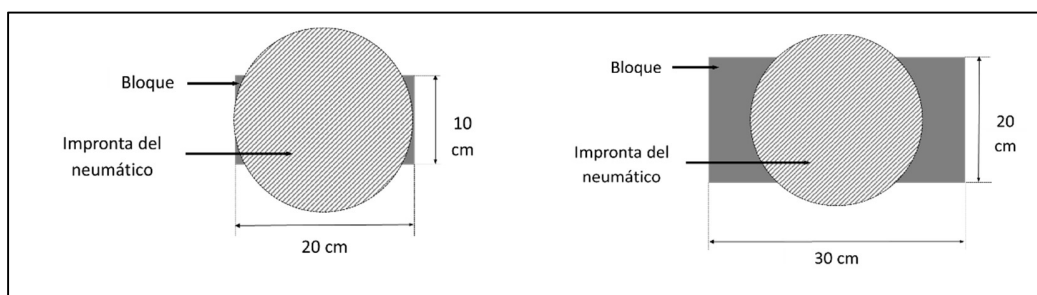


Figura 5-2: Interacción tamaño del bloque e impronta del neumático

Considerando un análisis estático de la impronta del neumático, en el caso de los bloques de hormigón, sus dimensiones típicas (20 x 10 cm) no lo hacen trabajar a flexo-tracción ya que prácticamente la impronta cubre un área mayor al del bloque generando cargas de compresión. Para bloques con mayores dimensiones, las condiciones no son las mismas y existe una probabilidad de ocurrencia de esfuerzos a flexo-tracción ya que al menos una de sus dimensiones (largo) es mayor al área que cubre la impronta del neumático.

b) Impronta combinada

Para la impronta combinada se utilizó la fórmula propuesta por la Portland Cement Association (PCA):

$$L = \sqrt{\frac{A_c}{0.5227}} \quad (5.2)$$

Donde:

- L = longitud de la impronta (m)
 A_c = área de la impronta (m²) (corresponde a un rectángulo con dos semi-círculos, asumiendo como hipótesis que el diámetro de la parte circular de la impronta (ϕ) equivale al 60% de su longitud ($\phi = 0.6L$))

Las dimensiones calculadas para la huella combinada son: longitud de 22 cm y un ancho de 13 cm aproximadamente.

Las dimensiones obtenidas para las dos improntas de neumático son una primera aproximación para establecer el rango del tamaño de bloque; es decir: 20 cm x 20 cm y 25 cm x 15 cm.

5.1.2 Constructabilidad

Dos aspectos se consideran para analizar la constructabilidad referida al bloque de asfalto: su peso y su forma de colocación.

Cuando se hace referencia a los bloques de hormigón de tamaño típico (20 x 10 x 8 cm) su tamaño permite que sea tomado y colocado con una sola mano, ayudado también por su peso que no sobrepasa los 4 kg que pueden ser levantados y trasladados con mayor facilidad. En el caso de tener un bloque con dimensiones más grandes, éste tendrá que ser tomado y colocado con las dos manos por las condiciones de su tamaño y peso. No obstante, al poseer unas dimensiones planas mayores comparado con el tamaño típico del bloque de hormigón se cubrirá un área mayor aumentando la producción en la construcción.

Para lograr lo anterior, el bloque de asfalto debe presentar un equilibrio entre sus dimensiones y peso que le permitan ser tomado y colocado con facilidad y ser competitivo con el bloque de hormigón (para este trabajo se consideró un peso que oscila entre 4 y 5 kg). Esto se consigue aprovechando la menor densidad de la mezcla asfáltica comparada con el hormigón y la posibilidad de tener menores espesores. La Figura 5-3 presenta los pesos de los bloques de asfalto según sus dimensiones en planta y espesor. La densidad de la mezcla utilizada para estos cálculos corresponde a un valor típico obtenido en trabajos previos de laboratorio en esta investigación.

Los tamaños que cumplen con la condición de peso y unas dimensiones planas mayores fueron: 25 cm x 15 cm y 20 cm x 20 cm.

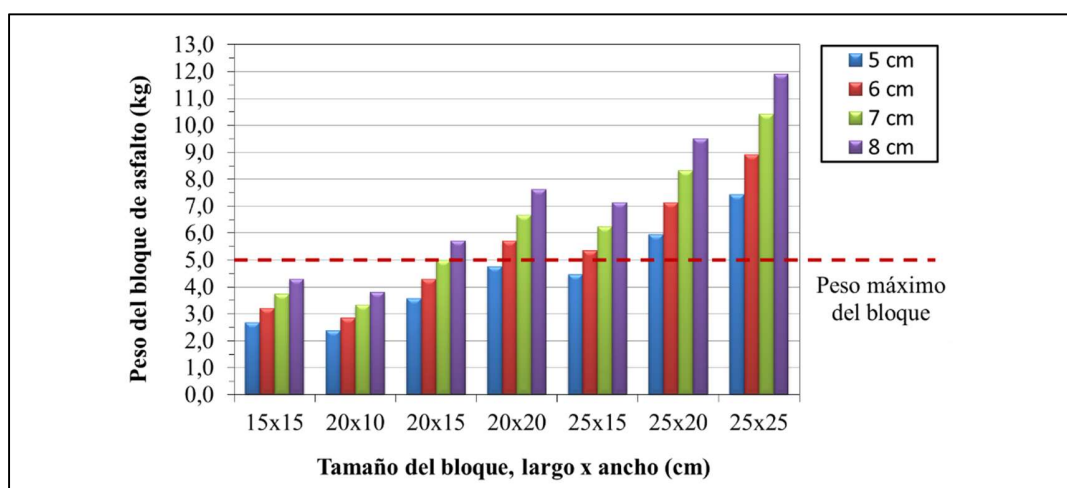


Figura 5-3: Comparación pesos de bloques asfálticos según sus dimensiones

5.1.3 Distribución de esfuerzos bajo la capa de rodado

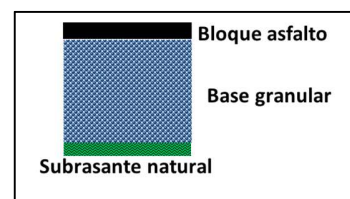
Se utilizó el programa de computador EverFE V 2.25 para modelar los distintos tamaños de bloque asfáltico como si fuera una losa de hormigón con dimensiones más

reducidas, asumiendo que se comporta como un elemento rígido apoyado sobre una capa elástica modelada mediante resortes siguiendo el modelo de Winkler.

El aspecto de mayor interés en esta parte del estudio es determinar los esfuerzos de tracción bajo el bloque. Las modelaciones en el programa de computador permiten establecer los tamaños de bloque que mejor distribuyen los esfuerzos debajo del bloque. También se pueden establecer los estados tensionales en otros puntos de la estructura modelada, lo cual se presenta en el Anexo G. Los distintos modelos de pavimentos se basan en las propiedades y valores establecidos en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Valores típicos para la caracterización de los materiales de un pavimento articulado para un solo bloque de asfalto

Material	Espesor (cm)	Módulo (MPa)	Relación de Poisson (μ)
Bloque asfalto	5	3800	0,35
Base granular	20	110	0,40
Subrasante	-	60	0,45



En la Figura 5-4 se observa un resumen de las distintas tensiones actuantes sobre un pavimento con una capa de rodado compuesta por un bloque de asfalto.

De acuerdo con los datos obtenidos los tamaños de bloque más adecuados teniendo en cuenta como criterios de selección aquel que transmita menores esfuerzos de tracción debajo del bloque (20 cm x 20 cm) y aquel que transmita menores esfuerzos de compresión sobre la sub-rasante en la mayoría de los casos (25 cm x 15 cm). Los esfuerzos de tracción calculados deben compararse con el módulo de rotura de los bloques ensayados a flexo-tracción, el cual debe ser mayor para garantizar que el bloque no se fracture ante la sollicitación de la carga.

Teniendo en cuenta los tres factores para estimar las dimensiones planas del bloque, los tamaños utilizados para la construcción del tramo experimental son: 20 cm x 20 cm y 25 cm x 15 cm.

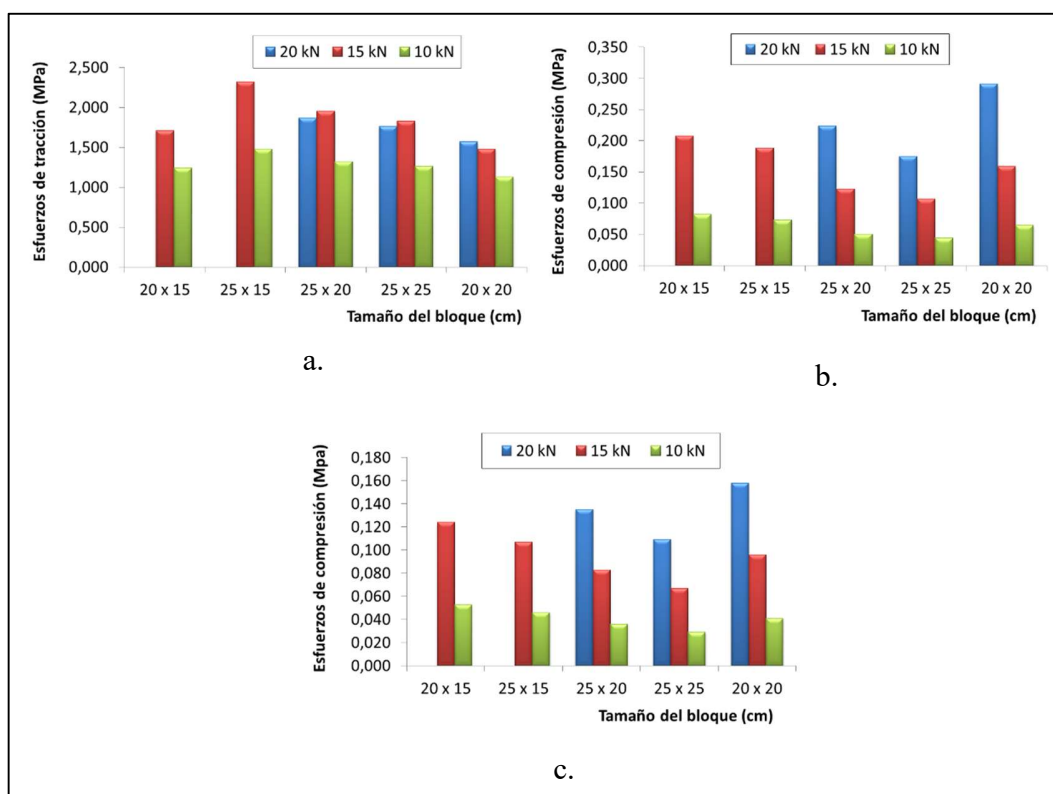


Figura 5-4: Tensiones en un pavimento de bloques de distintos tamaños.

a. Tensiones de tracción en la fibra inferior del bloque b. Tensiones de compresión encima de la base granular c. Tensiones de compresión encima de la sub-rasante

5.2 Construcción del modelo físico experimental (pista de prueba)

Se construyó un modelo físico experimental en terreno a escala real que permitió dos objetivos: obtener los bloques de asfalto con y sin RAP y la evaluación deflectométrica del pavimento articulado con estos bloques. Su construcción se llevó a cabo dentro de los terrenos de la planta de fabricación de mezclas asfálticas y producción de

agregados de la empresa Asfaltos Quilín en la Comuna de Pudahuel (Santiago de Chile). La Figura 5-5 presenta la localización de la pista de prueba.

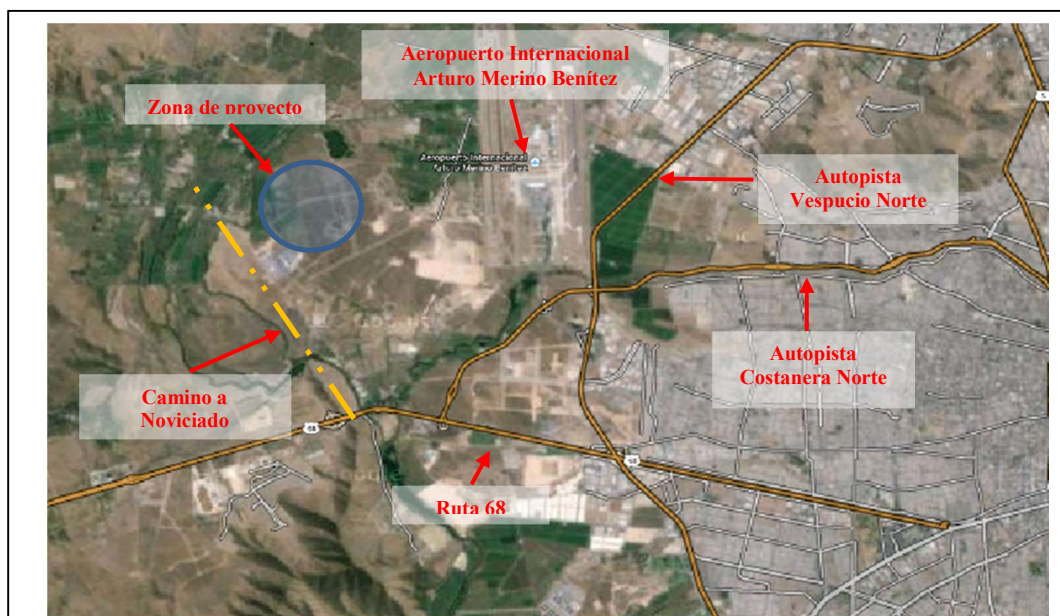


Figura 5-5: Localización de la zona de proyecto

Las dimensiones del modelo experimental son: 4 m de ancho y 20 m de largo. El ancho de la pista se sub-dividió en dos pistas de 2 m cada una. El largo de la pista se sub-dividió en tres tramos y a cada uno de ellos se le extendió una mezcla asfáltica con un contenido de RAP diferente: 0, 15 y 25%. La Figura 5-6 muestra la nomenclatura y sentido de avance del proyecto.

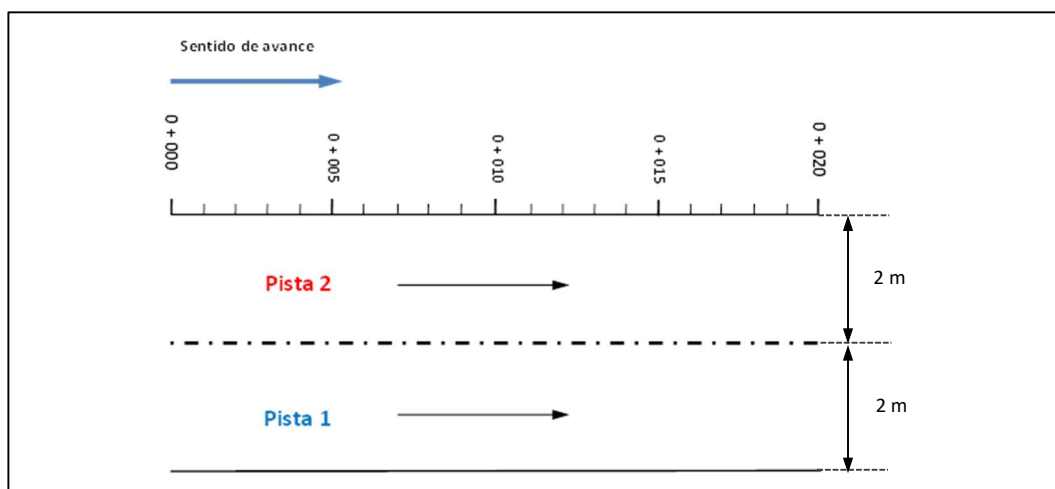


Figura 5-6: Esquema de las pistas y abscisado del tramo de prueba

5.2.1 Obtención de los bloques

Para obtener los bloques de asfalto se siguió un procedimiento no tradicional que contiene las siguientes labores: escarpado del terreno, extensión y compactación de la base granular, extensión y compactación de la mezclas asfáltica en caliente (con y sin RAP), cortado de la capa asfáltica y retiro de los bloques. A continuación se describen cada una de estas labores.

a. Escarpado del terreno

Se quitó la capa vegetal y los primeros 30 cm de la capa de suelo existente. La Figura 5-7 muestra el terreno escarpado y el estacado con la indicación del espesor a extender para la extensión y compactación de la base granular.

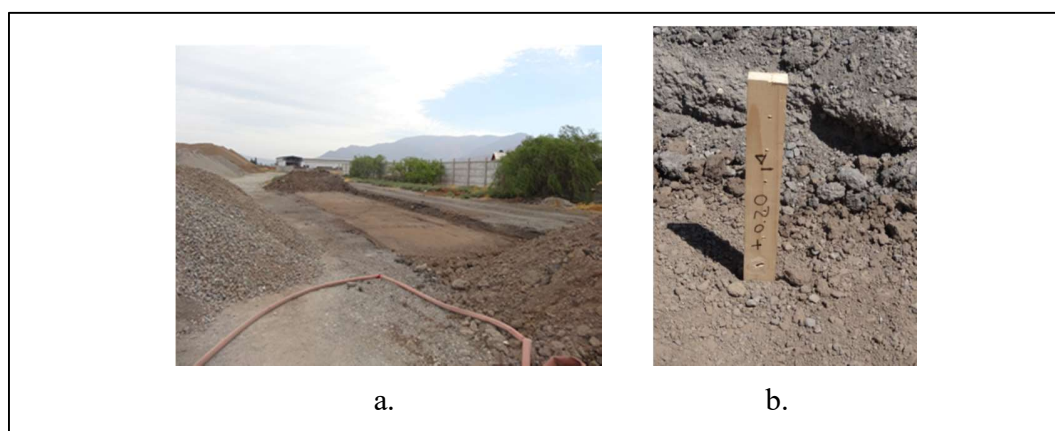


Figura 5-7: Escarpado del terreno. a. Suelo de fundación o sub-rasante del pavimento b. Estacado para la demarcación del espesor de material granular a extender

b. Extensión y compactación de la base granular

La Figura 5-8 muestra el material de base granular de CBR 80% que se extendió y compactó en un espesor de 20 cm. La compactación se realizó mediante un rodillo liso vibratorio de 20 toneladas. El tramo fue abscisado mediante estacas de madera con indicaciones cada 5 metros.



Figura 5-8: Conformación de la capa de base granular a. Material granular para capa de base (CBR=80%) b. Estaca para el abscisado del tramo de prueba

c. Extensión y compactación de la mezcla asfáltica (con y sin RAP)

Este procedimiento incluye las siguientes actividades: fabricación de las mezclas asfálticas en caliente con y sin RAP y, la extensión y compactación de las mezclas asfálticas con granulometría IV-A-12 para capa de rodadura según el Ministerio de Obras Públicas de Chile. La Tabla 5-2 y Figura 5-9 presentan el esquema de la composición de cada uno de los sub-tramos.

Tabla 5-2. Sub-tramos de construcción con distintos contenidos de RAP

Sub-tramo	Abscisas	Longitud (m)	Contenido de RAP de la mezcla asfáltica (%)
1	K0+000 – K0+004	4	0
2	K0+004 – K0+013	9	15
3	K0+013 – K0+020	7	25

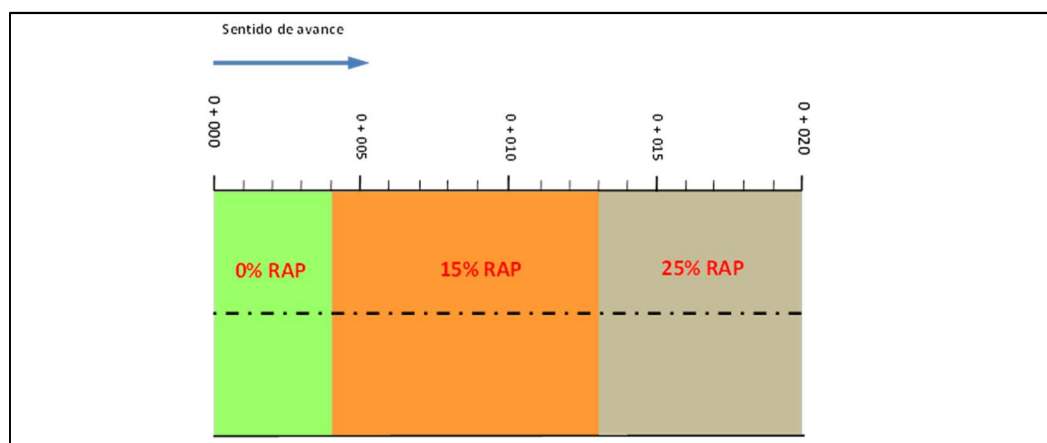


Figura 5-9: Contenido de material reciclado (RAP) en los diferentes sub-tramos del proyecto

La construcción de la capa de rodadura requirió de las siguientes labores:

- Reprocesamiento del RAP a través de una trituradora de impacto de eje horizontal. El RAP fue separado en dos tamaños: una primera fracción pasante del tamiz $\frac{3}{4}$ " y retenida en el N° 4 y una segunda fracción de material pasante el tamiz N° 4. La Figura 5-10 muestra los acopios del RAP reprocesado.



Figura 5-10: Acopio de material RAP en sus dos fracciones

- La Figura 5-11 representa la calibración de la planta para la producción de mezcla asfáltica que incluyó: dosificación de agregados, temperatura y contenido de asfalto. Se alimentaron dos buzones de material reciclado y dos buzones de agregado virgen.

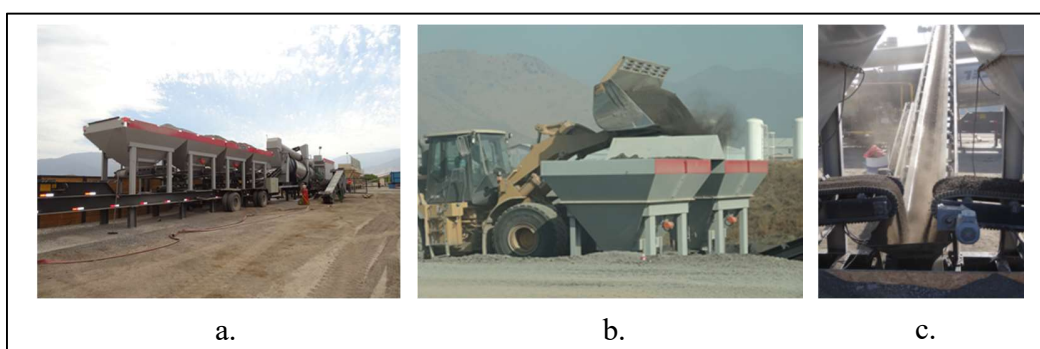


Figura 5-11: Fabricación de las mezclas asfálticas con distintos contenidos de material reciclado (RAP) a. Planta asfáltica TICEL (buzón de los agregados vírgenes) b. Alimentación de los buzones del RAP c. Dosificación de los dos tamaños del RAP

- Extensión de una capa de arena fina de forma “venteada” para evitar que la mezcla asfáltica se pegara a la base granular y permitiera el posterior retiro de los bloques de asfalto. De manera paralela a la fabricación de la mezcla, se procedió a realizar la demarcación de los tres sub-tramos sobre la capa de base granular y la ubicación de la maquinaria respectiva para la extensión de las mezclas como se muestra en la Figura 5-12.

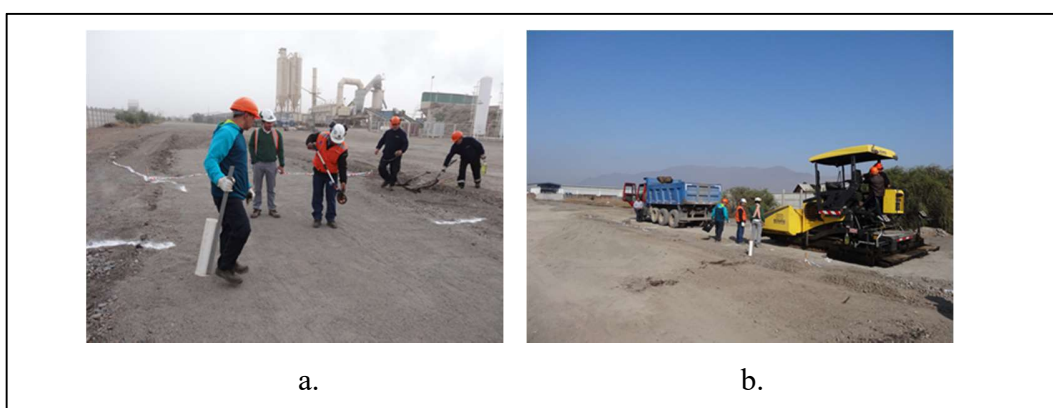


Figura 5-12: Labores previas a la extensión de las mezclas asfálticas
a. Demarcación de sub-tramos b. Puesta en obra de la maquinaria

La Figura 5-13 muestra la extensión y compactación de las mezclas asfálticas con y sin RAP de acuerdo con los sub-tramos pre-establecidos para los contenidos de RAP incorporados a la mezcla.



Figura 5-13: Extensión y compactación de las mezclas asfálticas.

a. Trabajos de extensión con terminadora b. Compactación con rodillo liso vibratorio c. Compactación con neumáticos

- El control de compactación se realizó mediante un densímetro nuclear tomando como referencia la gravedad máxima teórica de las mezclas. Se tomaron ocho puntos elegidos al azar, distribuyendo los puntos de evaluación en las dos pistas y el centro del tramo experimental. El valor promedio obtenido fue del 96,4%, oscilando para una confiabilidad del 95% del error estándar entre un 94,6% a un 98,3%. Esto indica que el contenido de vacíos oscila entre un 1,7 a 5,4% con un promedio de 3,6%. La localización de los puntos de compactación controlados se presentan en el Anexo H.

d. Corte de la capa asfáltica y retiro de los bloques

Como se muestra en la Figura 5-14 mediante una cortadora de pavimentos se realizaron los cortes para la demarcación de los bloques según el siguiente patrón: para la pista 1 (derecha) el tamaño del corte es rectangular de 25 x 15 cm, mientras que para la pista 2 (izquierda) los cortes fueron cuadrados de 20x20 cm.



Figura 5-14. Proceso de cortado de la capa asfáltica a. Cortadora para pavimento
b. Cortes en ambas pistas

Se retiraron los bloques obtenidos del corte de la capa asfáltica para ser colocados y armados en un pavimento del tipo articulado. La Figura 5-15 muestra los bloques extraídos para cada uno de los tramos.



Figura 5-15: Retirado de los bloques obtenidos del corte del pavimento

5.2.2 Armado de la capa con bloques de asfalto

La Tabla 5-3 y la Figura 5-16 presentan la propuesta de armado de los bloques de asfalto identificando: tamaño del bloque, tipo de pista, contenido de RAP en la mezcla y patrón de colocación. Para permitir un mejor acomodo del bloque y lograr una superficie pareja de la capa de rodadura se extendió una capa de arena fina de 2 cm de espesor suelto. Los espacios indicados con “arena” no tienen bloques porque se descartaron algunos de ellos al fracturarse en el proceso de corte o no cumplieron con el espesor de diseño del bloque. La Figura 5-17 muestra una secuencia de fotografías correspondientes a la etapa de construcción de la capa de bloques, tanto de hormigón como de asfalto.

Tabla 5-3: Configuración de los bloques utilizados para la construcción del tramo de prueba

Abscisa	Pista 1 (Bloques rectangulares)	Pista 2 (Bloques cuadrados)
K0+000 – K0+002.5	Arena (no hay bloques)	Arena (no hay bloques)
K0+002.5 – K0+004.5	Configuración 1 (trabada) – 0% RAP	Configuración 1 (trabada) – 0% RAP
K0+004.5 – K0+007.5	Configuración 1 (trabada) – 15% RAP	Configuración 1 (trabada) – 15% RAP
K0+007.5 – K0+010.5	Configuración 2 (alineada) – 15% RAP	Configuración 2 (alineada) – 15% RAP
K0+010.5 – K0+012.5	Arena (no hay bloques)	Vacío (no hay bloques)
K0+012.5 – K0+014.5		Configuración 1 (trabada) – 25% RAP
K0+014.5 – K0+015.5	Configuración 1 (trabada) – 25% RAP	
K0+015.5 – K0+018.5	Configuración 2 (alineada) – 25% RAP	Configuración 2 (alineada) – 25% RAP
K0+018.5 – K0+020	Adoquín de hormigón tipo cesta	Adoquín de hormigón (trabado)

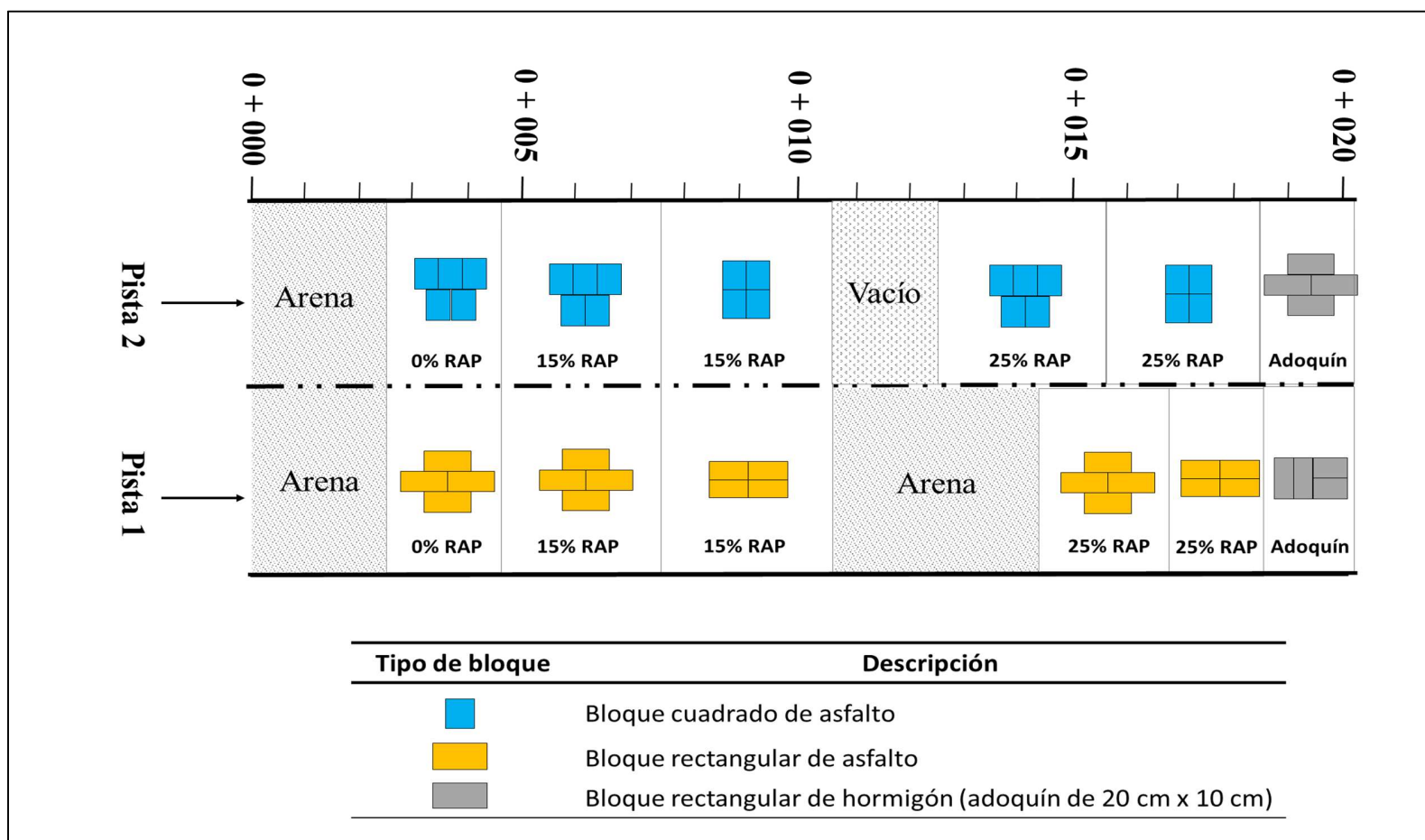


Figura 5-16: Esquema de construcción de tramo de prueba

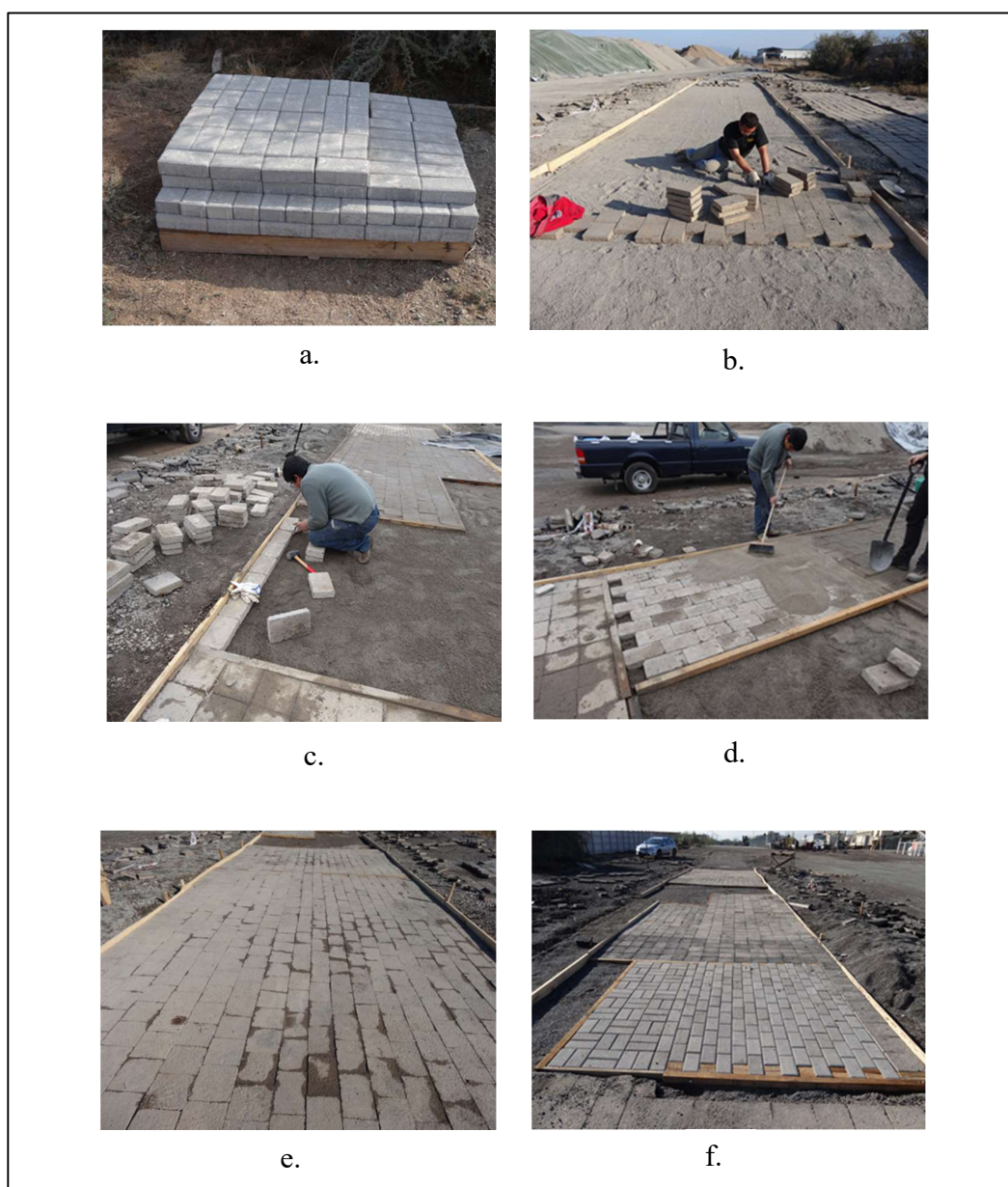


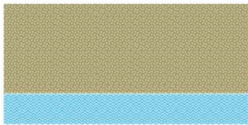
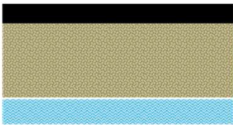
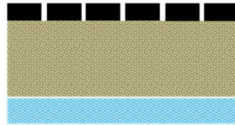
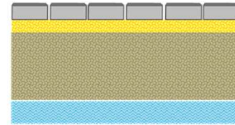
Figura 5-17: Construcción de la capa de rodadura articulada

a. Bloques de hormigón (adoquines) b. Armado de un tramo de pavimento con bloques de asfalto c. Colocación de los bloques de asfalto d. Extensión de arena para sello de juntas e. Panorámica general del terminado del pavimento de bloques de asfalto f. Terminado de los tramos de bloques de asfalto y hormigón

5.3 Análisis deflectométrico del pavimento articulado con bloques de asfalto

Esta parte del estudio presenta el procedimiento para realizar la deflectometría de impacto utilizando un FWD (Falling Weight Deflectometer) sobre 4 distintos escenarios definidos para el modelo físico experimental, cuyo objetivo fue determinar los módulos de las distintas capas del pavimento para posteriormente realizar la propuesta del diseño estructural de un pavimento articulado con bloques de asfalto. La Tabla 5-4 presenta los escenarios que representan un momento específico de la construcción del pavimento.

Tabla 5-4: Escenarios para el análisis deflectométrico del pavimento

Escenario N° 1	Escenario N° 2	Escenario N° 3	Escenario N° 4
			
Base granular (20 cm) Sub-rasante	Capa asfáltica (5 cm) Base granular (20 cm) Sub-rasante	Capa asfáltica cortada Base granular (20 cm) Sub-rasante	Bloques asfálticos Arena (2 cm) Base granular (20 cm) Sub-rasante

Se aplicaron 3 niveles de carga: 30, 40 y 50 kN y una configuración de los geófonos como se muestra en la Figura 5-18.

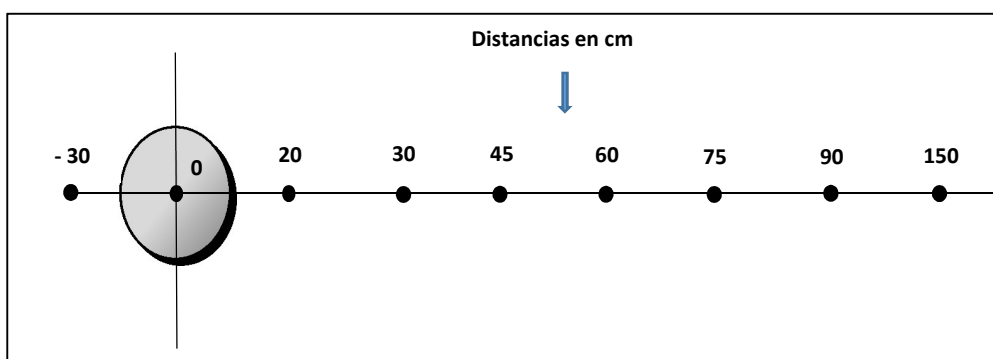


Figura 5-18: Posición de los sensores del FWD

El procedimiento seguido en terreno se presenta en la Figura 5-19.



Figura 5-19: Deflectometría de impacto

a, b. sobre capa granular c, d. sobre la capa de asfalto continuo e, f. sobre la capa de asfalto cortada g, h. sobre la capa de bloques

Las figuras a y b muestran el posicionamiento del deflectómetro de impacto sobre la capa de base granular. La figura c presenta el trabajo de deflectometría sobre la capa de asfalto continuo, mientras que la figura d muestra el control de temperatura de las capas asfálticas para realizar la corrección de las deflexiones medidas por el FWD. Las figuras e y f muestran la deflectometría sobre la capa asfáltica cortada y finalmente las figuras g y h presentan los tramos de pavimento armados con bloques de hormigón y con bloques de asfalto respectivamente, y su evaluación deflectométrica.

El control de temperatura mencionado para las capas asfálticas se realizó a una profundidad de 2 cm y a los tres estados que corresponden a capas asfálticas: capa continua, capa cortada y capa con bloques de asfalto.

5.3.1 Métodos para analizar los datos de deflexión

Uno de los métodos más comunes para el análisis de los datos de deflexión es retro-calcular las propiedades para cada capa en la estructura del pavimento y la sub-rasante. Este método de análisis provee los módulos elásticos de las capas que son generalmente utilizados para la evaluación estructural del pavimento y el diseño de la rehabilitación.

En este trabajo se han utilizado dos herramientas en conjunto para realizar los análisis respectivos de retro-cálculo. El método AASHTO, con el cual se obtiene el módulo resiliente de la sub-rasante. A partir de este dato y utilizando el programa de computador EVERCALC se ejecutan los retro-cálculos para las otras capas. Este programa de computador pertenece al paquete de programación EVERSERIES propuesto por la Dirección de Transporte del Estado de Washington y es utilizado para retro-calcular los módulos elásticos de las capas de un pavimento a partir de los datos obtenidos en la deflectometría de impacto. El Anexo H presenta una breve descripción de estos métodos.

5.3.2 Retro-cálculo del módulo resiliente de las capas del pavimento

El módulo resiliente de la sub-rasante se estimó a partir de los datos deflectométricos del escenario 1 y la aplicación del método AASHTO. El promedio arrojó un valor de 61 MPa.

Para la base granular, se utilizaron los datos deflectométricos del escenario 1 y la aplicación del programa EVERCAL. El valor del módulo promedio retro-calculado fue de 110 MPa.

Los datos deflectométricos del escenario 3 y el uso del EVERCALC permitieron retro-calcular el módulo de la capa asfáltica continua para una temperatura de referencia de 20 °C. A continuación se presentan los valores promedios de los módulos obtenidos y entre paréntesis el intervalo de confianza para un 95% de confiabilidad del error estándar:

- Capa asfáltica patrón (0% RAP)= 4.015 MPa (2.630 MPa – 5.400 MPa)
- Capa asfáltica con 15% RAP= 3.743 MPa (2.500 MPa – 5.010 MPa)
- Capa asfáltica con 25% RAP = 3.886 MPa (3.700 MPa – 4.060 MPa)

Se decidió obtener un promedio de módulo para que represente la capa asfáltica independiente del contenido de RAP incorporado en la mezcla. El valor obtenido fue de 3.832 MPa oscilando entre 3.083 MPa a 4.580 MPa para una confiabilidad del 95% del error estándar. Para este trabajo se decidió emplear un valor de 3.800 MPa como valor representativo. Los cálculos para la obtención de estos valores se presentan en el Anexo I.

El escenario 4 fue la base para el retro-cálculo del módulo de la capa de bloques asfálticos para una temperatura de referencia de 20 °C. A continuación se presentan

los valores promedios de los módulos retro-calculados y entre paréntesis el intervalo de confianza para un 95% de confiabilidad del error estándar:

- Capa de bloques con 0% RAP= 2.468 MPa (2.260 MPa – 2.675 MPa)
- Capa de bloques con 15% RAP= 2.511 MPa (2.263 MPa – 2.760 MPa)
- Capa de bloques con 25% RAP = 2.326 MPa (2.148 MPa – 2.504 MPa)
- Capa de adoquín= 2.423 MPa (2.347 MPa – 2.500 MPa)

La Figura 5-20 presenta de forma gráfica los módulos retro-calculados de las capas de bloques. Se incluyen las barras del error estándar para el 95% de confianza. El valor promedio de módulo representativo de toda la capa de bloques independiente de la forma del bloque y su patrón de colocación y el contenido de RAP de la mezcla fue de 2.440 MPa, oscilando entre 2.307 MPa y 2.572 MPa según el error estándar para el 95% de confiabilidad. En este trabajo se decidió utilizar como módulo representativo de la capa de bloques asfálticos el valor de 2.300 MPa, siendo un valor conservador por estar en el límite inferior del rango mencionado. El Anexo I presenta en detalle los valores y cálculos utilizados para retro-calcular el módulo resiliente de las capas del pavimento.

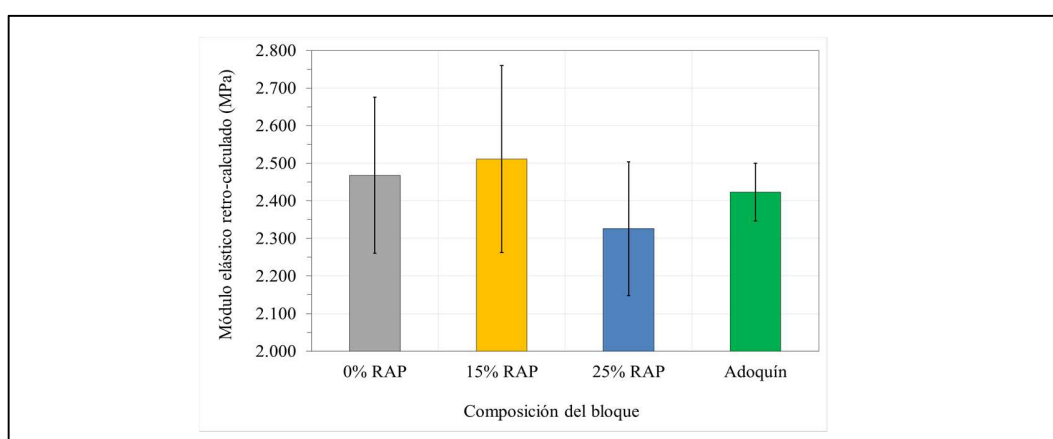


Figura 5-20: Módulos de la capa de bloque retro-calculados para los distintos contenidos de RAP y la capa de adoquín.

5.3.3 Evaluación del aporte estructural de la capa de bloques según los cuencos de deflexión

Según el tamaño del bloque y su patrón de colocación se realizó un análisis de la capacidad estructural ofrecida por la capa de bloques utilizando los datos del cuenco de deflexión. Se emplean los siguientes parámetros propuestos para el análisis del cuenco de deflexión: radio de curvatura (R_0C), área (A), área bajo el perfil del pavimento (A_{UPP}) y el índice de área (AI_I) (Horak, Emery, & Maina, s.f), y por otro lado, la diferencia del número estructural efectivo ($NE_{efectivo}$) estimado de la evaluación deflectométrica y el proceso de retro-cálculo para los escenarios 1 (base granular) y 4 (con bloques asfálticos).

Los análisis son los siguientes:

- a. Según la carga aplicada.
- b. Según el tamaño del bloque
- c. Según el patrón de colocación
- d. Para los bloques de hormigón con dos patrones de colocación del bloque.
- e. Análisis comparativo de la evaluación estructural de los bloques asfálticos y los bloques de hormigón (adoquines).

- a) Según la carga aplicada

La Figura 5-21 presenta las mediciones de deflexiones para los escenarios 1, 2 y 4 de pavimento (base granular, capa asfáltica continua, capa de bloques de asfalto en invierno y en verano). Se observa que las deflexiones medidas se incrementan con la carga aplicada de 30 a 50 kN independientemente de la estructura del pavimento y el tipo de escenario estudiado. Esta información confirma el hecho de que el comportamiento estructural (deflexión) del pavimento es función directa de la sollicitación mecánica (carga).

Los cuencos de deflexión calculados para el escenario del pavimento con bloques asfálticos tanto en invierno como en verano muestran una curva quebrada con puntos de inflexión bien marcados. Otros estudios han reportado una situación similar (Pierre, Bresson, & Juneau, 2009).

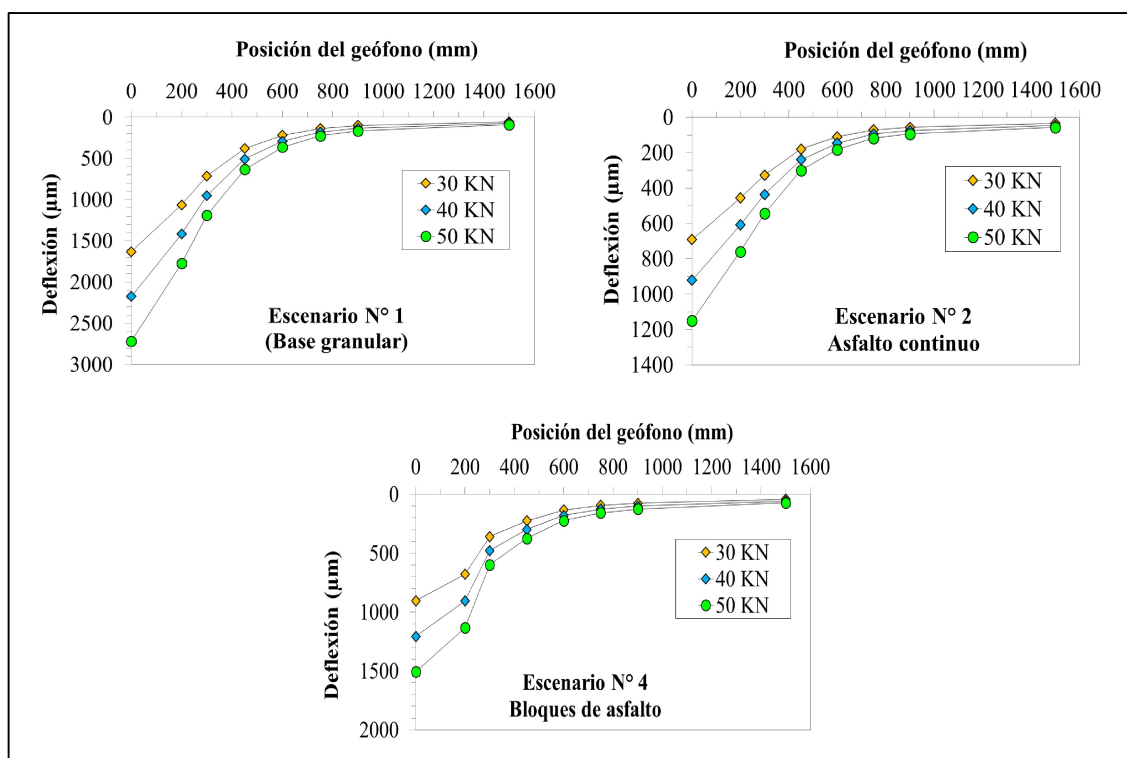


Figura 5-21: Cuencos de deflexión según la carga aplicada (K0+017)

La Figura 5-22 muestra que la relación entre las deflexiones normalizadas y las amplitudes de cargas presenta una tendencia lineal para todos los escenarios de pavimentos estudiados. Esto indica que las capas que componen el pavimento están respondiendo dentro del rango elástico, lo que permite desarrollar un análisis estructural de los tramos construidos mediante la teoría elástica de los pavimentos obteniendo resultados confiables. Esta tendencia se presenta en todos los tramos analizados en esta investigación.

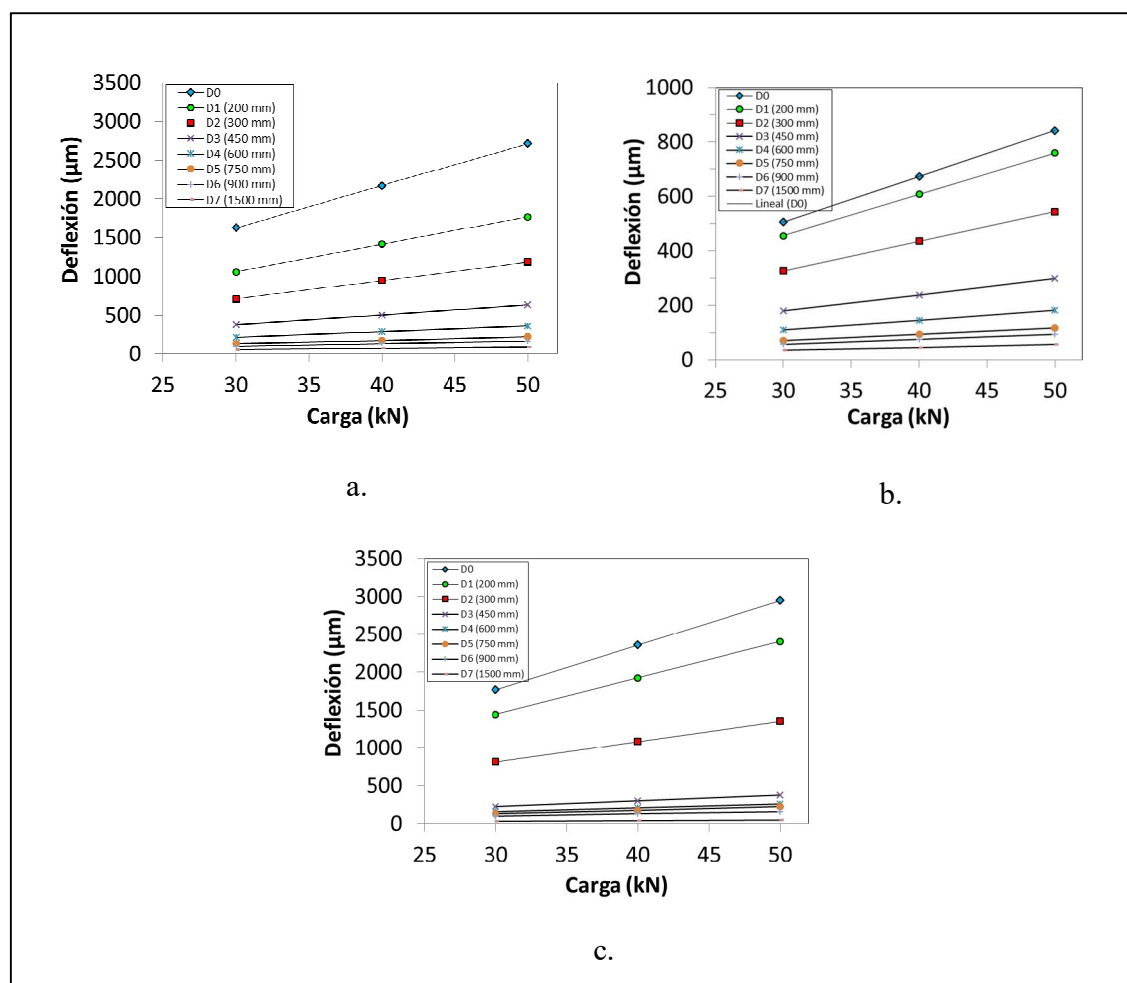


Figura 5-22: Deflexiones promedio normalizadas medidas para tres estados del pavimento a diferentes cargas aplicadas (K0+017). a. Escenario sobre base granular b. Escenario capa asfáltica continua c. Escenario capa de bloques

La Figura 5-23 presenta la relación entre la deflexión en el punto de aplicación de la carga, D_0 y la amplitud de la carga. Se observa una tendencia lineal de la respuesta del pavimento en todos los escenarios estudiados. Para los escenarios 1 y 4 (pavimento con base granular y el pavimento con la capa de bloques asfálticos) la pendiente de las rectas es mayor que la de los otros escenarios, lo cual indica que la respuesta estructural del pavimento es más sensible a la aplicación de una carga y que el aporte estructural

de la capa de bloques se ve considerablemente reducida comparada con una capa de asfalto continua.

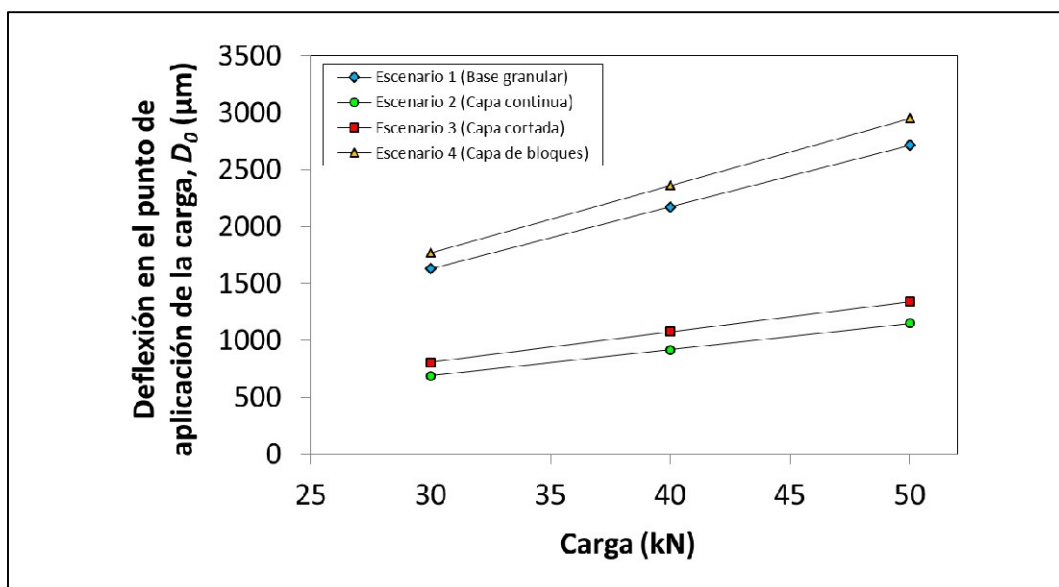


Figura 5-23: Variación de la deflexión máxima según la aplicación de cargas

b) Según el tamaño del bloque

El análisis comprende los dos tamaños de bloque empleados en esta investigación y dos patrones de colocación del bloque: trabada y alineada.

i) Patrón de colocación trabada

La Figura 5-24 presenta las deflexiones D_0 normalizadas para una carga de 40 kN para los bloques de forma cuadrada y rectangular. Los cuencos de deflexión son similares para ambos tamaños de bloques y los dos contenidos de RAP estudiados diferenciándose únicamente en la deflexión máxima medida.

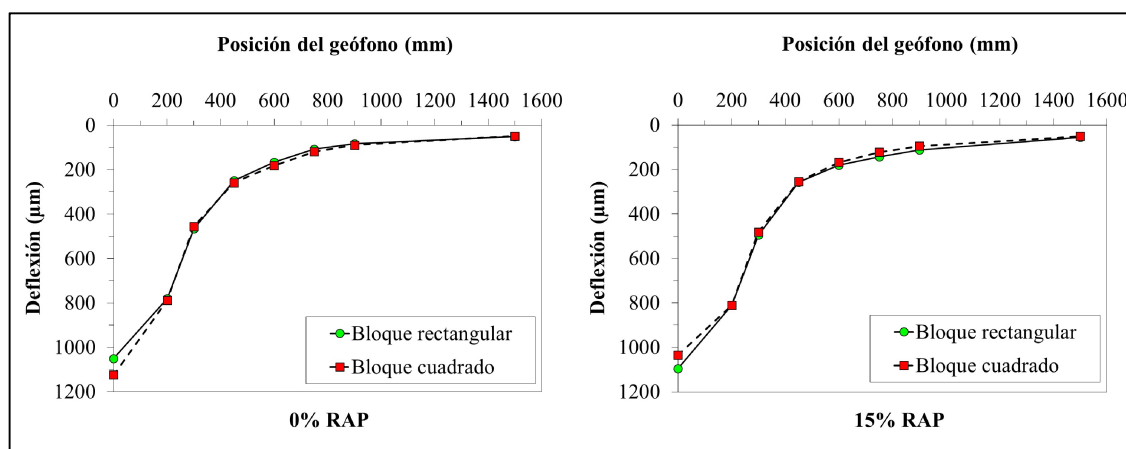


Figura 5-24: Cuencos de deflexión para un patrón de colocación tipo trabado.

Para evaluar el aporte estructural de la capa de bloques de asfalto se estimó la diferencia de los números estructurales efectivos ($\Delta N_{\text{efectivo}}$) obtenidos del retro-cálculo del escenario 4 (con bloques) y el escenario 1 (con base granular). Estos valores se presentan en la Figura 5-25 con un error estándar asociado al 95% de confiabilidad. Estos valores son similares en magnitud, siendo ligeramente mayores los obtenidos para el bloque rectangular elaborados sin RAP y el bloque cuadrado elaborado con un 15% RAP.

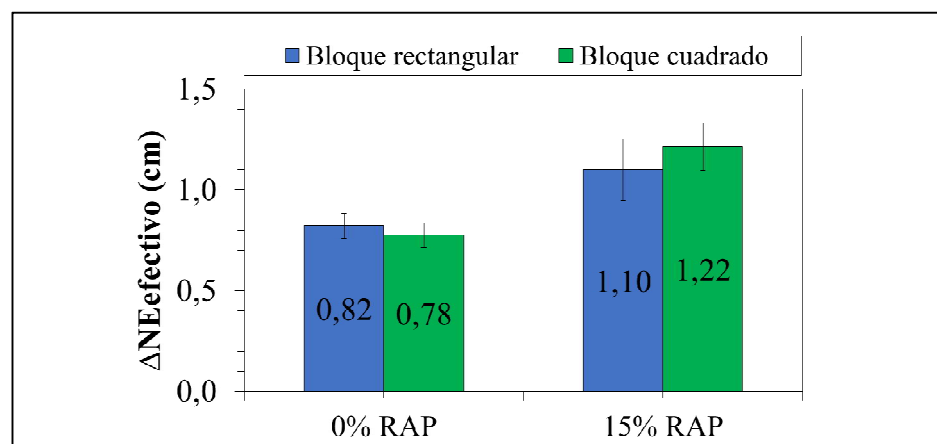


Figura 5-25: Comparación Número Estructural Efectivo patrón tipo trabado

Otro análisis de los resultados se presenta en la Tabla 5-5. Se calcularon los parámetros del cuenco de deflexión que están más relacionados con la condición de la capa superficial como el Índice de Área (AI_I) y el Área Bajo el Perfil del Pavimento (A_{UPP}) y de la respuesta estructural de la estructura del pavimento mediante la estimación del Área (A). Estos parámetros permiten analizar el aporte estructural de la capa de bloques debido a que el resto de la estructura del pavimento es igual para todos los tramos, variando únicamente la condición constructiva de la capa de bloques asfálticos.

Los valores indican que existe un mayor aporte estructural del bloque rectangular sin incorporación de RAP comparado con el bloque de forma cuadrada determinado por los mayores valores de los parámetros A , AI_I y A_{UPP} . Para la adición del 15% RAP, es el bloque cuadrado el que presenta los mayores valores pero prácticamente similares a los del bloque rectangular.

Considerando los contenidos de RAP adicionados a las mezclas, se observa que los bloques con un 15% RAP muestran los mayores valores de los parámetros de deflexión, indicando un mejor respuesta estructural del pavimento ante la aplicación de las cargas.

Tabla 5-5: Parámetros del cuenco de deflexión para bloques con patrón de colocación trabada

% RAP	Tipo de bloque	D_0 (mm)	$R_0 C$ (m)	A (mm)	AI_I (mm)	A_{UPP} (mm)
0% RAP	Rectangular	1050,88	57,18	342,41	0,72	6,28
	Cuadrado	1124,32	43,68	331,88	0,70	6,21
15% RAP	Rectangular	1095,71	53,98	350,20	0,73	6,33
	Cuadrado	1034,58	73,16	351,63	0,73	6,34

a. Para capa de bloques

<i>% RAP</i>	<i>Pista N°</i>	<i>D₀ (mm)</i>	<i>R₀C (m)</i>	<i>A (mm)</i>	<i>AI_I (mm)</i>	<i>A_{UPP} (mm)</i>
0% RAP	1	846,63	114,45	447,63	0,82	6,98
	2	1024,23	44,27	384,03	0,76	6,56
15% RAP	1	975,01	52,03	401,53	0,78	6,68
	2	994,70	67,81	418,34	0,80	6,79

b. Para capa de asfalto continua

De acuerdo con los datos obtenidos, se concluye que la mejor respuesta estructural del pavimento con bloque asfálticos para un patrón de colocación trabado, se obtiene cuando se utilizan bloques rectangulares y un 15% RAP incorporado en la mezcla. Si se compara la capa de bloques con la capa continua de asfalto, la respuesta estructural es mejor para la capa continua debido a los mayores valores de los parámetros del cuenco de deflexión. Esta condición era de esperarse justificado por la efectividad de la transferencia de carga de las juntas de la capa de bloques, la cual se ve reducida cuando se compara con la capa de forma continua. La reducción en la respuesta estructural de la capa de bloques oscila entre 13 y 24%.

ii) Patrón de colocación alineada

La Figura 5-26 muestra los cuencos de deflexión para los tramos de pavimentos con patrón de colocación de bloques tipo alineado con dos contenidos de RAP diferentes. En este proyecto no se configuró ningún tramo con bloques alineados con el 0% RAP. Se observa que los cuencos de deflexión se intercambian para los dos contenidos de RAP en el bloque; es decir, que para un 15% RAP es el bloque cuadrado el que presenta menor deflexión comparado con el bloque rectangular, pero para el 25% RAP esta tendencia es invertida.

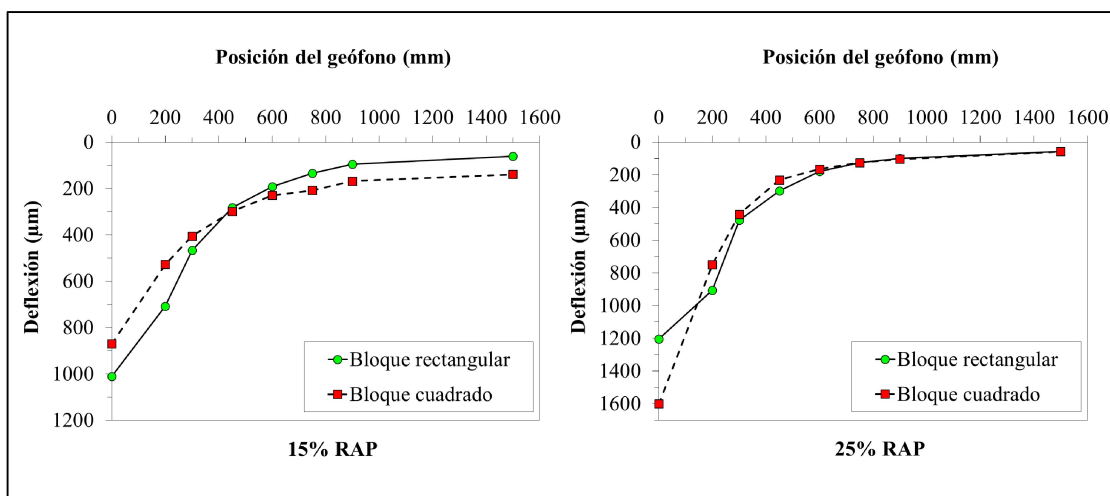


Figura 5-26: Cuencos de deflexión para un patrón de colocación tipo alineado.

El aporte estructural de la capa de bloques de asfalto se estimó calculando la diferencia de los números estructurales efectivos ($\Delta N E_{\text{efectivo}}$) obtenidos del retro-cálculo del escenario 4 (con bloques) y el escenario 1 (con base granular). Estos valores se presentan en la Figura 5-27 con un error estándar asociado al 95% de confiabilidad. Para los bloques con un 15% RAP se obtuvo un mejor aporte estructural del bloque cuadrado mientras que para los bloques con 25% RAP la tendencia es inversa, aunque en éste último caso con magnitudes bastante similares. También se observa que independientemente de la forma del bloque, el mayor aporte estructural se obtiene con los bloques elaborados con incorporación del 25% RAP en la mezcla.

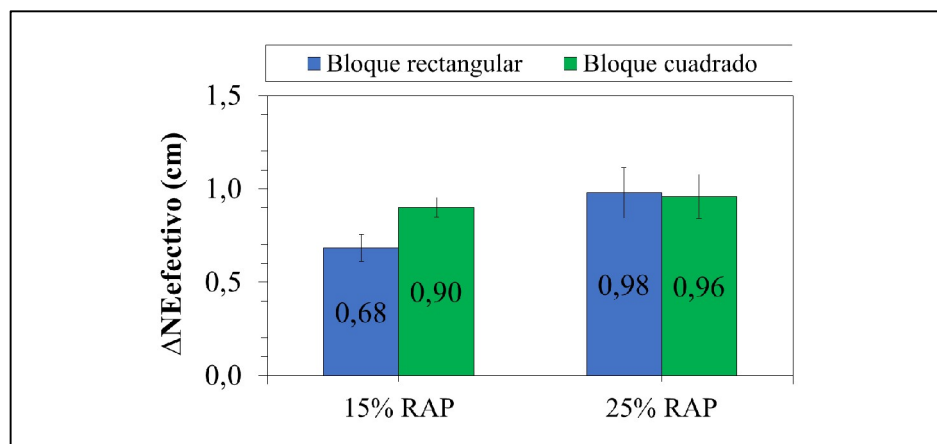


Figura 5-27: Comparación Número Estructural Efectivo tipo alineado.

La Tabla 5-6 presenta los valores para los parámetros del cuenco de deflexión. Los valores de los parámetros de área refuerzan la interpretación dada para el número estructural efectivo. Es decir, que el mayor aporte estructural se obtiene para el bloque rectangular comparado con el bloque cuadrado y para ambos contenidos de RAP estudiados.

Tabla 5-6: Parámetros del cuenco de deflexión para bloques con patrón tipo alineado

% RAP	Tipo de bloque	D_0 (mm)	$R_0 C$ (m)	A (mm)	AI_1 (mm)	A_{UPP} (mm)
15% RAP	Rectangular	1010,09	48,40	359,50	0,73	6,40
	Cuadrado	869,81	36,94	329,36	0,68	6,20
25% RAP	Rectangular	1205,54	52,38	325,88	0,70	6,17
	Cuadrado	1232,51	26,22	310,37	0,68	6,07

a. Para capa de bloques

% RAP	Pista N°	$D_{0.075} (mm)$	$R_{0.075} C (m)$	$A (mm)$	$AI_1 (mm)$	$A_{UPP} (mm)$
15% RAP	1	1029,72	36,81	343,75	0,72	6,29
	2	1302,74	21,98	305,11	0,69	6,03
25% RAP	1	921,34	44,00	351,46	0,74	6,34
	2	940,41	38,14	344,76	0,73	6,30

b. Para capa de asfalto continua

De acuerdo con el análisis realizado, se concluye que la mejor respuesta estructural del pavimento con bloque asfálticos para un patrón de colocación alineado se obtiene cuando se utilizan bloques rectangulares y un 15% RAP incorporado en la mezcla. Al comparar los resultados para la capa de bloques y la capa continua de asfalto se observa una inconsistencia para las mezclas con el 15% RAP debido a que se presenta una mejor respuesta estructural para la capa de bloques comparada con la capa continua de asfalto. Esto se puede deber a la variabilidad en el proceso de toma de resultados debido a que, en ocasiones, es complicado mantener exactamente el mismo punto para la toma de datos. Los resultados son consistentes para las mezclas con 25% RAP, presentando una disminución en la respuesta estructural de la capa de bloques comparada con la capa continua de asfalto que oscila entre el 7 y el 10%.

c) Según el patrón de colocación de los bloques

Se compararon los cuencos de deflexión calculados para los distintos tramos con patrón de colocación de los bloques diferente: trabada y alineada, para bloques con 15 y 25% RAP.

La Figura 5-28 muestra que la configuración tipo alineada presenta menores deflexiones para un contenido de RAP del 15%, mientras que para un 25% RAP la configuración tipo trabada es la que menor deflexión presenta. El aporte estructural de la capa de bloques de asfalto se estimó calculando la diferencia de los números

estructurales efectivos ($\Delta N_{\text{efectivo}}$) obtenidos del retro-cálculo del escenario 4 (con bloques) y el escenario 1 (con base granular). Estos valores se presentan en la Figura 5-29 con un error estándar asociado al 95% de confiabilidad. Se observa que en la mayoría de los casos es el patrón de colocación trabado el que brinda un mayor aporte estructural comparado con el patrón del tipo alineado. Solamente los bloques cuadrados y con un 25% RAP en su mezcla muestran un aporte estructural prácticamente igual para los dos patrones de colocación.

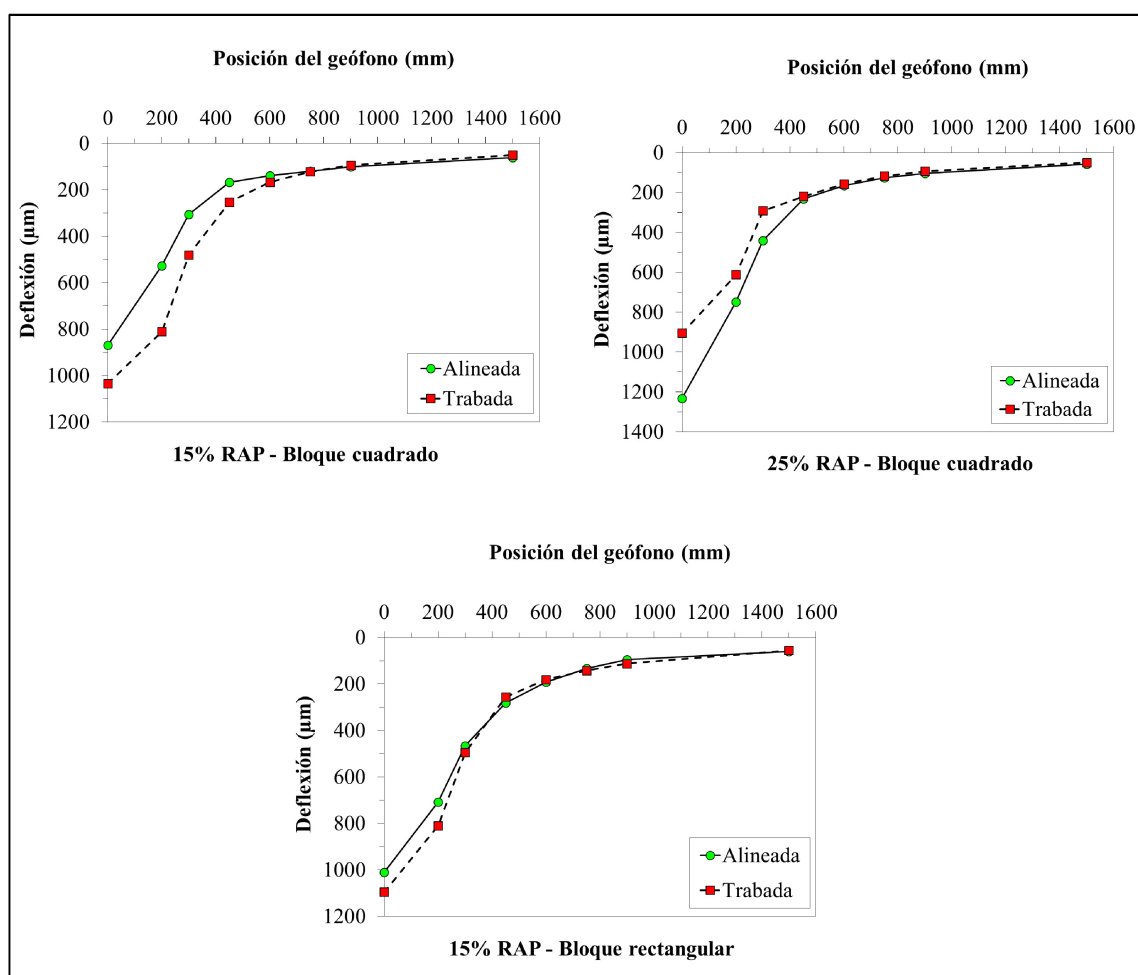


Figura 5-28: Cuencos de deflexión según patrón de colocación y contenido de RAP en la mezcla del bloque

La Tabla 5-7 presenta los valores para los parámetros del cuenco de deflexión para esta parte del estudio. Los mayores valores de los parámetros de área indican que existe una mejor respuesta estructural en el caso de los bloques cuadrados para el patrón de colocación del tipo trabada para ambos contenidos de RAP estudiados. En el caso de los bloques rectangulares, la mejor respuesta estructural fue para el patrón alineado aunque sin diferencias considerables con el patrón de colocación trabado.

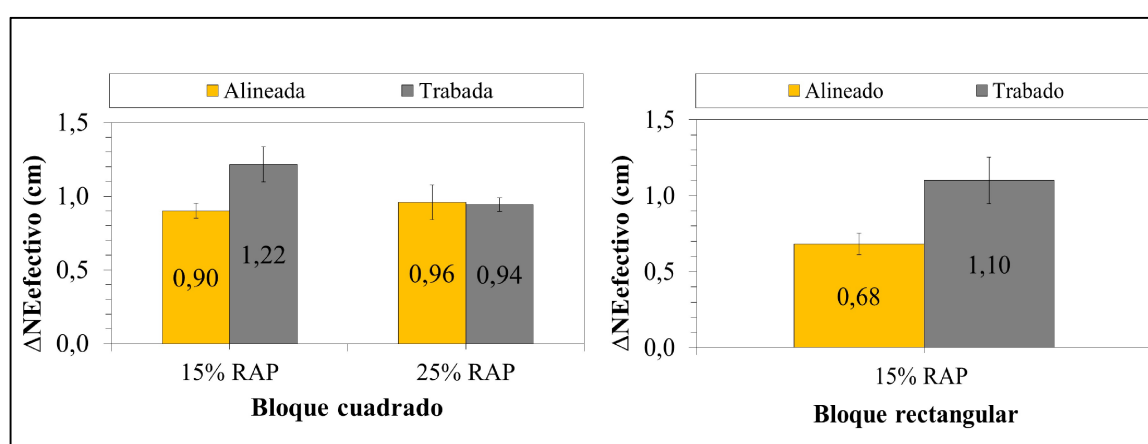


Figura 5-29: Número estructural efectivo según el patrón de colocación de los bloques

Tabla 5-7: Parámetros del cuenco de deflexión según el patrón de colocación del bloque

<i>Tipo de bloque</i>	<i>% RAP</i>	<i>Tipo de alineación</i>	<i>D₀ (mm)</i>	<i>R₀C (m)</i>	<i>A (mm)</i>	<i>AI₁ (mm)</i>	<i>A_{UPP} (mm)</i>
Cuadrado	15% RAP	Trabada	1034,58	73,16	351,63	0,73	6,34
		Alineada	869,81	36,94	329,36	0,68	6,20
	25% RAP	Trabada	904,85	48,09	313,94	0,66	6,09
		Alineada	1232,51	26,22	310,37	0,68	6,07
Rectangular	15% RAP	Trabada	1095,71	53,98	350,20	0,73	6,33
		Alineada	1010,09	48,40	359,50	0,73	6,40

De acuerdo con el análisis realizado, se concluye que la mejor respuesta estructural del pavimento según el patrón de colocación del bloque asfálticos obtuvo para el bloque rectangular con un 15% RAP en la mezcla y una configuración alineada del

bloque. Para los bloques cuadrado y rectangular con un 15% RAP, la configuración trabada de bloques entrega respuestas estructurales similares y no muy lejanas de la mejor situación encontrada (bloque rectangular con 15% RAP).

d) Para los bloques de hormigón.

Se establecieron dos patrones de colocación diferentes para el tramo construido con bloques de hormigón como se observa en la Figura 5-30. Se eligieron bloques de 6 cm de espesor destinados principalmente para tráfico peatonal y un bajo volumen de tránsito con cargas bajas (por tratarse del espesor similar al del bloque asfáltico).

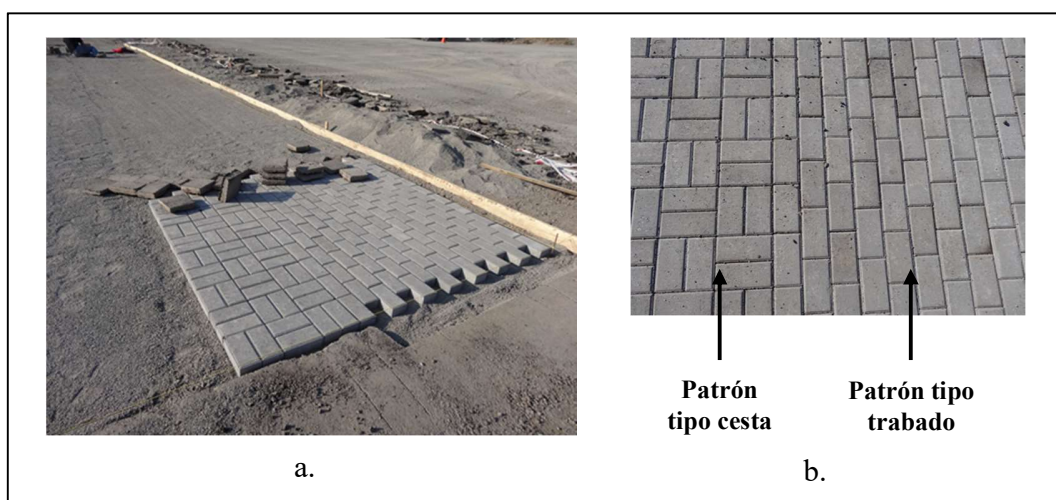


Figura 5-30: Construcción de un tramo de pavimento articulado con bloques de hormigón. a. Panorámica de la construcción. b. Patrones de colocación de los bloques

La Figura 5-31 muestra los cuencos de deflexión para las dos patrones de colocación del bloque de hormigón y los tres niveles de carga empleados en el ensayo FWD. Se observa que para el tramo construido con el patrón tipo cesta, el cuenco de deflexión

es más profundo en su parte inicial, lo que se interpreta como una mayor deformación en el pavimento en la zona aledaña a la imposición de la carga.

El aporte estructural de la capa de bloques de asfalto se estimó calculando la diferencia de los números estructurales efectivos ($\Delta NE_{\text{efectivo}}$) obtenidos del retro-cálculo del escenario 4 (con adoquines) y el escenario 1 (con base granular). Estos valores se presentan en la Figura 5-32 con un error estándar asociado al 95% de confiabilidad, la cual muestra que el aporte estructural de la capa de adoquines es similar independiente del patrón de colocación utilizado, siendo un poco más alto para el patrón trabado pero con una mayor dispersión en sus resultados.

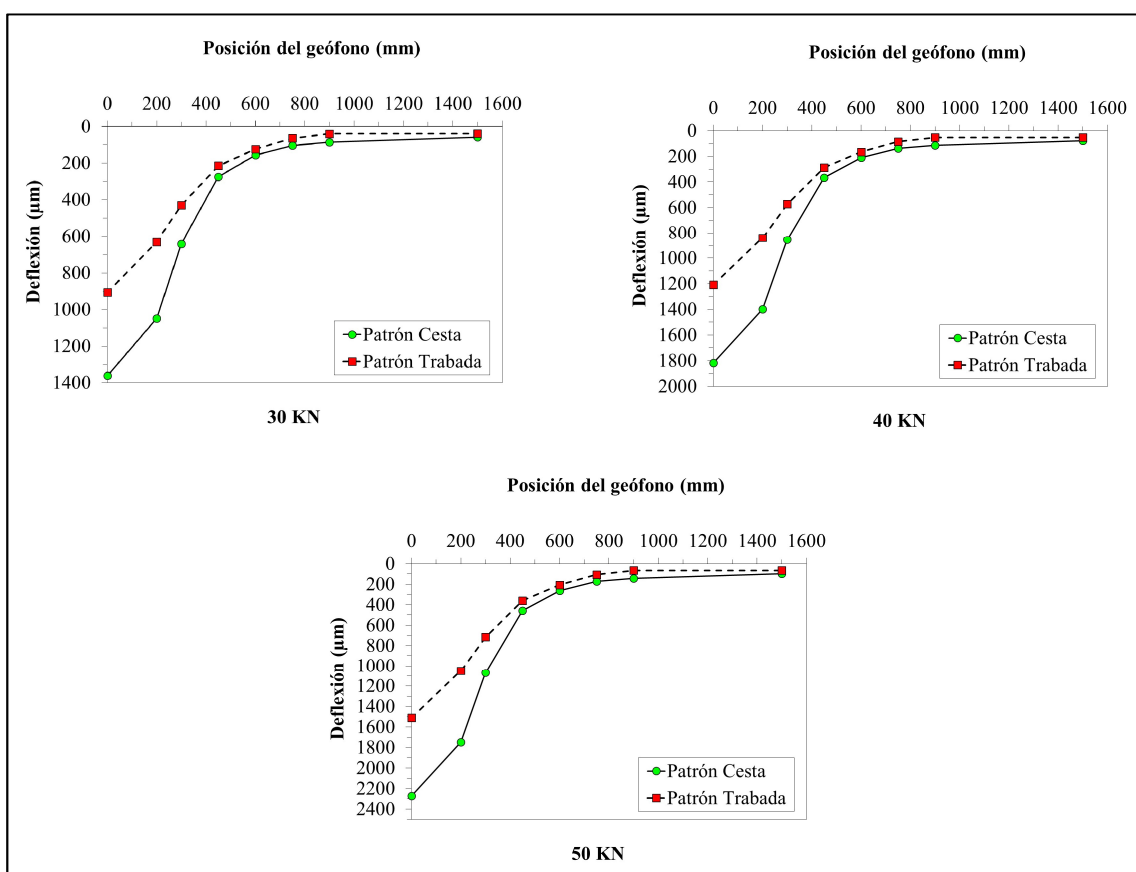


Figura 5-31: Cuencos de deflexión para el tramo con bloques de hormigón-adoquines

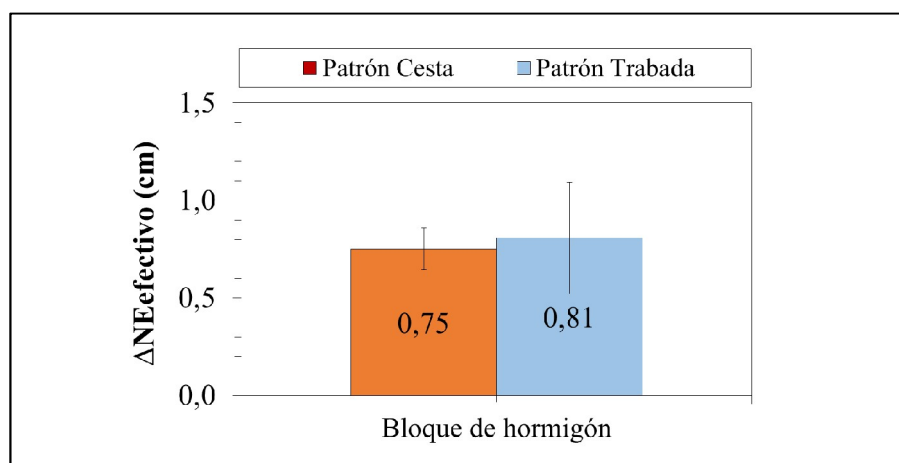


Figura 5-32: Número estructural efectivo para la capa de adoquines

La Tabla 5-8 presenta los valores para los parámetros del cuenco de deflexión para los adoquines. Los mayores valores de los parámetros de área indican que existe una mejor respuesta estructural en el caso de los adoquines para el patrón de colocación del tipo trabada. No obstante, prácticamente no existen diferencias entre los parámetros de área AI_1 y A_{UPP} para los dos patrones de colocación. Esto indica una condición similar de la capa de adoquines para la distribución de los esfuerzos inducidos por la carga impuesta, por lo que podría utilizarse cualquiera de los dos patrones obteniendo prácticamente la misma respuesta estructural del pavimento.

Tabla 5-8: Parámetros del cuenco de deflexión según el patrón de colocación del bloque

<i>Tipo de patrón</i>	<i>D_θ (mm)</i>	<i>R_θC (m)</i>	<i>A (mm)</i>	<i>AI₁ (mm)</i>	<i>A_{UPP} (mm)</i>
Cesta	1816,98	38,38	335,25	0,74	6,24
Trabado	1209,18	39,20	339,72	0,74	6,26

a. Para la capa de bloques

<i>% RAP</i>	<i>Pista N°</i>	<i>D₀ (mm)</i>	<i>R₀C (m)</i>	<i>A (mm)</i>	<i>AI₁ (mm)</i>	<i>A_{UPP} (mm)</i>
25% RAP	1	675,58	80,68	425,09	0,79	6,83
	2	615,34	107,37	441,34	0,81	6,94

b. Para la capa de asfalto continuo

De acuerdo con el análisis realizado, se concluye que la mejor respuesta estructural del pavimento se obtuvo para el patrón de colocación del adoquín de forma trabada. No obstante, los valores tanto del aporte estructural medido con la diferencia del número estructural efectivo y los parámetros de área analizados muestran valores muy similares indicando que no existe una gran diferencia en el comportamiento estructural de la capa de bloques armada con los dos patrones de colocación estudiados. Los resultados son consistentes cuando se compara la capa de adoquines con la capa continua de asfalto debido a que son mayores los valores de los parámetros del cuenco de deflexión para la capa continua. Esto se debe a que la discontinuidad de las juntas que se generan por la colocación de los bloques reduce la eficiencia en la transferencia de la carga impuesta. La reducción del parámetro área de la capa de bloques respecto a la de asfalto continuo oscila entre el 21 y 23%, lo que representa la disminución de la respuesta estructural de esta capa.

e) Análisis comparativo de la evaluación estructural de los bloques asfálticos y los bloques de hormigón (adoquines).

Se compararon los cuencos de deflexión de tres tipos de bloques: asfáltico rectangular, asfáltico cuadrado y el de hormigón rectangular o adoquín. Se incluyeron los bloques asfálticos con los tres contenidos de RAP en la mezcla. La Figura 5-33 muestra que el bloque de hormigón o adoquín presenta máximas deflexiones mayores comparadas con las de los bloques de asfalto.

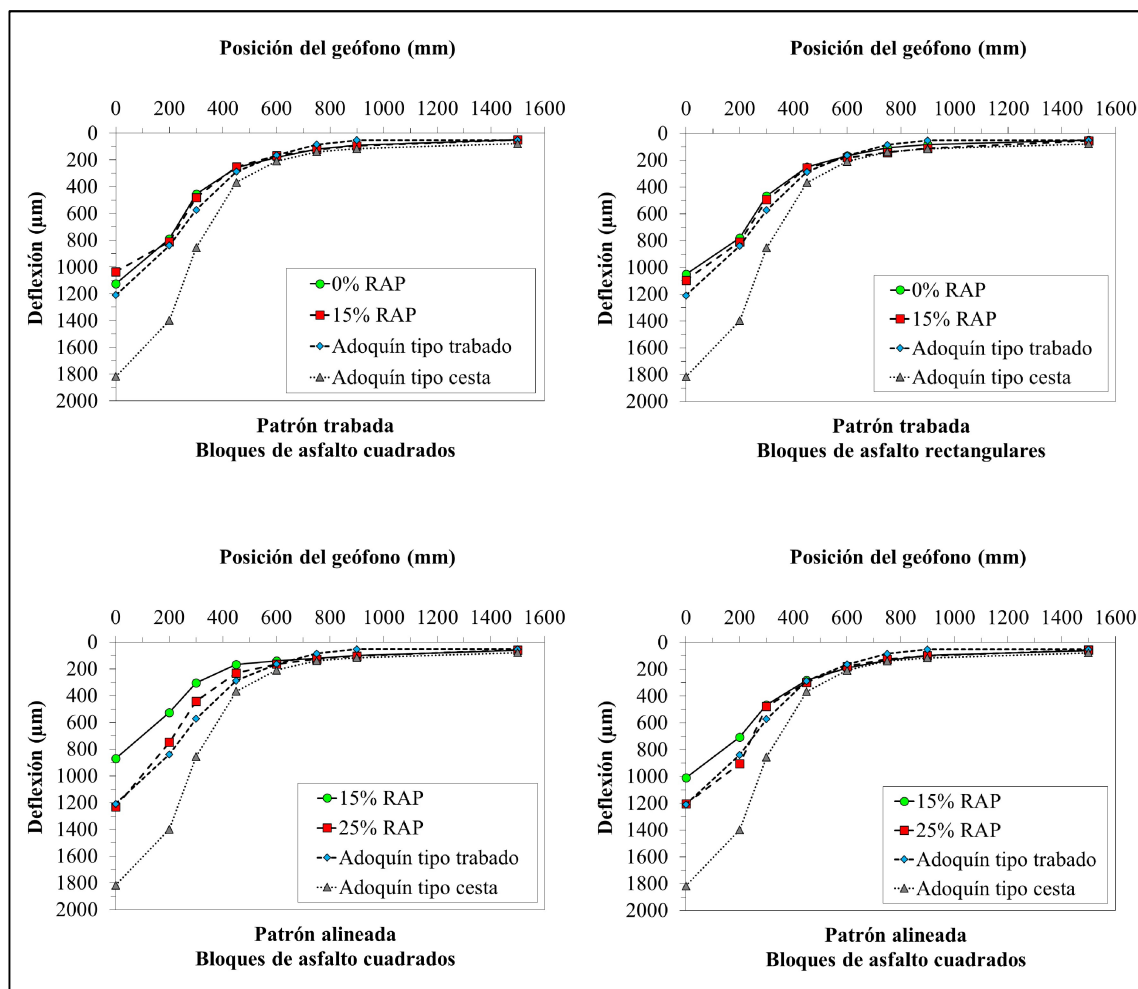


Figura 5-33: Comparación cuencos de deflexión según tipología de bloques

Los valores del número estructural efectivo retro-calculado para cada condición de pavimento con bloque de asfalto se presentan en la Figura 5-34, para una confiabilidad del 95% del error estándar de las mediciones. Los mayores valores se obtuvieron para los bloques de forma rectangular para los tres contenidos de RAP y los dos tamaños estudiados.

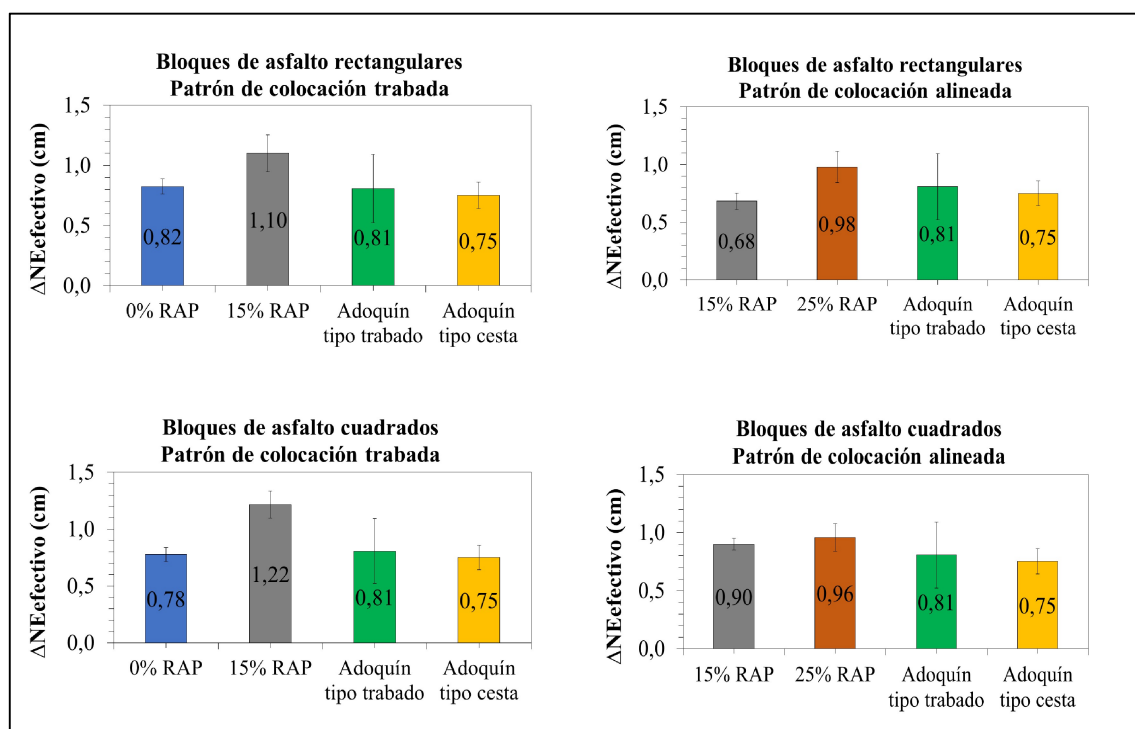


Figura 5-34: Comparación de los Números Estructurales efectivos

Se concluye que la mejor respuesta estructural del pavimento según el patrón de colocación del bloque asfáltico obtuvo para el bloque rectangular con un 15% RAP en la mezcla y una configuración trabada del bloque. El aporte estructural de los bloques de asfalto en muchos de los puntos experimentales analizados es mayor comparado con el presentado por el adoquín, lo cual hace al bloque de asfalto una solución comparable y competitiva respecto a la tradicional con bloques de hormigón. También, la respuesta estructural de la capa de bloques de asfalto comparada con la capa continua es menor entre un 13% a un 24%.

5.4 Propuesta de diseño estructural para pavimentos de bloques asfálticos

La propuesta de diseño de pavimentos articulados con bloques asfálticos asume como hipótesis que su comportamiento estructural se asemeja al de un pavimento flexible tradicional, en donde los esfuerzos ocasionados por la imposición de la carga del tránsito se disipan a través de la profundidad de las capas y responden de manera elástica. El procedimiento seguido para la construcción de la propuesta de diseño estructural consta de: la determinación de los módulos elásticos de las capas del pavimento, el análisis del criterio de diseño y la construcción de las cartas gráficas de diseño.

5.4.1 Módulos elásticos de las capas del pavimento

a) Módulo de la sub-rasante

La resistencia de la sub-rasante se puede caracterizar en términos del valor de diseño de CBR. Como las soluciones propuestas en este trabajo se construyeron empleando el método mecanicista de multicapas que emplea como parámetro de diseño de la sub-rasante la propiedad del Módulo Resiliente (M_R), se recomienda utilizar las ecuaciones 5.1 y 5.2 para la estimación de dicha propiedad con base en el valor del CBR (Dirección de Vialidad - Ministerio de Obras Públicas Chile, 2015):

$$M_R = 17,6 \times CBR^{0,64} \text{ (MPa)} \quad 2\% < CBR < 12\% \quad (5.1)$$

$$M_R = 22,1 \times CBR^{0,55} \text{ (MPa)} \quad 12\% < CBR < 80\% \quad (5.2)$$

b) Módulo de la base granular

Se adoptó la ecuación 5.3 propuesta por la SHELL para asignar los módulos a la capa de base granular.

$$E_{bg} = 0,2 \times h_{bg}^{0,45} \times E_{sr} \text{ (MPa)} \quad (5.3)$$

donde E_{bg} , es el módulo elástico de la capa de base granular (MPa), E_{sr} , el módulo elástico de la capa de sub-rasante (MPa) y H_{bg} , el espesor de la capa de base granular (mm).

c) Capa de bloques de asfalto

De acuerdo con la sección 5.3.2 el valor del módulo elástico de la capa de bloques asfálticos es de 2.300 MPa.

d) Tránsito de diseño

El tránsito de diseño corresponde al número de Ejes Equivalentes de Carga Acumulados (EEA) para el período de diseño para un eje estándar de 80 kN (8,16 t). Este trabajo propone diseños estructurales hasta 1×10^6 ejes equivalentes de carga, utilizando la configuración de la carga de diseño estándar de 40 kN para un semi-eje simple de rueda doble (basado en la carga legal por eje de 80 kN) con una separación centro a centro entre neumáticos de 350 mm y una presión de contacto uniforme de 800 kPa.

5.4.2 Criterio de diseño

Como se asumió que el comportamiento estructural de un pavimento con bloques es similar al de un pavimento flexible tradicional, el principal criterio de diseño es la falla por deformación de la sub-rasante. Por lo tanto, el parámetro crítico es la deformación vertical ϵ_v sobre la parte superior de la sub-rasante.

En esta investigación se propusieron las funciones de transferencia propuestos por el método sudafricano de diseño de pavimentos para una condición terminal de 20 mm de ahuellamiento debido a la deformación del suelo de sub-rasante (Theyse, Beer, & Rust, 1996).

La Ecuación 5.4 presenta la forma general de la función de transferencia para el suelo de sub-rasante con los coeficientes de regresión para dos niveles de servicio/categorías del camino: C y D, los cuales emplean valores de confiabilidad en el diseño de 80 y 50% respectivamente.

$$N = 10^{(A - 10 \times \text{Log} \epsilon_v)} \quad (5.4)$$

Donde, N es el número de ejes equivalentes admisibles, A es un valor que depende de la confiabilidad del diseño y ϵ_v la deformación vertical en la superficie de la sub-rasante. La Tabla 5-9 presenta los coeficientes de regresión utilizados según el método sudafricano para el diseño de pavimentos flexibles.

Tabla 5-9: Coeficientes de regresión para la función de transferencia general de deformación de la sub-rasante

Nivel de servicio/Categoría del camino	A (Coeficiente de regresión)
C	36,47
D	36,70

5.4.3 Cartas gráficas de diseño

Para construir las cartas gráficas de diseño de utilizaron dos herramientas: el programa EverStressFE y el método numérico de las diferencias divididas de Newton.

El software EverStress fue elaborado por la Universidad de Maine y se puede conseguir de forma gratuita (The University of Maine, s.f). Permite analizar los pavimentos flexibles mediante la herramienta de los elementos finitos en 3D. En este trabajo se utilizó para modelar una serie de combinaciones de secciones de pavimento articulado con bloques de asfalto, variando los espesores de la capa de base granular y obteniendo las deformaciones verticales actuantes sobre la sub-rasante. El método numérico de las diferencias divididas de Newton se empleó para determinar los polinomios que representan las curvas en todos los rangos estudiados, lo que permitió dibujar las distintas curvas de manera continua.

Las modelaciones se efectuaron conservando constante el espesor de los bloques de asfalto y variando el espesor de la base granular. Se calculó la deformación vertical de cada modelo cuidando que no superara a la deformación admisible dado por la ecuación 5.4. Este trabajo fue iterativo para cada nivel de servicio o categoría del camino. Estas modelaciones dieron origen a la Figura 5-35 y la Figura 5-36 que son básicamente las cartas de diseño para pavimentos de bloques asfálticos. Se consideró un espesor mínimo de 15 cm para la base granular.

Existen algunas consideraciones importantes sobre el diseño de estas cartas de diseño. Son:

- Las cartas de diseño corresponden a una etapa primaria o inicial debido a que emplean las funciones de transferencia propuestas por el método Sudafricano y aún no se encuentran validadas para las condiciones locales, por lo que podrán sufrir ajustes en etapas posteriores de investigación.
- Estas cartas no se corrigieron respecto a los factores daños ocasionados por la heterogeneidad en la composición las cargas vehiculares. Esto se justifica porque el pavimento de bloques se rigidiza bajo la repetición de las cargas del tránsito (los bloques se aprietan unos con otros), haciendo que el pavimento sea menos sensible a la carga con el paso del tiempo (Shackel, 1979). Tampoco hay evidencia para sugerir que la “ley de la cuarta potencia” o cualquier otro concepto de daño similar aplique a los pavimentos de bloques. Al contrario, los datos existentes sugieren que, al menos para cargas por rueda hasta 70 kN (7 t), ni las magnitudes ni el número de cargas vehiculares tienen un efecto sustancial sobre la respuesta de un pavimento de bloques una vez se haya trabado (Lock up) (Shackel, 1979; Shackel, 1980). En otras palabras, el concepto de equivalencia de carga no aplica a pavimentos de bloques (Shackel, 1986).
- Se recomienda que la capacidad de soporte de la subrasante sea mejorada cuando se estimen valores de CBR menores a 5%. Esta consideración debe tenerse en cuenta para evitar la rotura de los bloques por los esfuerzos de tracción ocasionados por la carga del tránsito.
- En una etapa de investigación posterior deberá evaluarse el efecto de la trabazón o lock up a un pavimento con bloques de asfalto puesto en servicio y corregir o modificar las respectivas cartas de diseño.

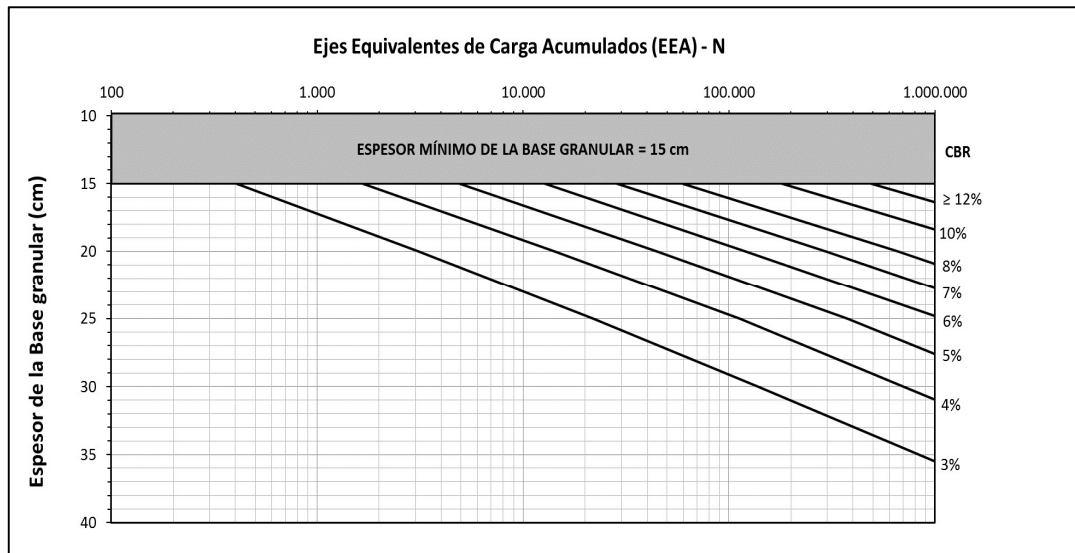


Figura 5-35: Carta de diseño para nivel de servicio/categoría del camino "C"
(Confiabilidad de diseño 80%)

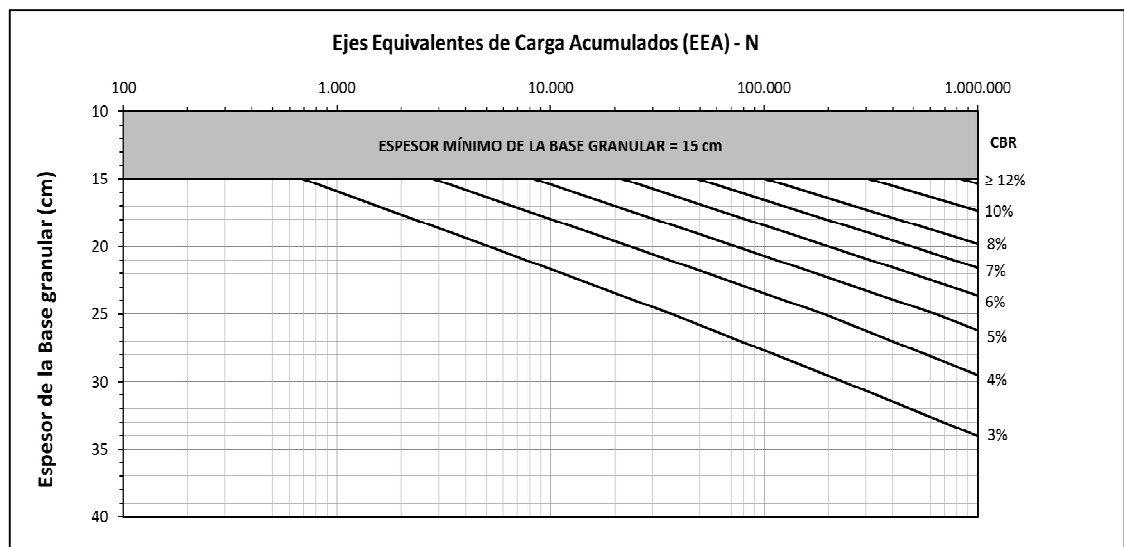


Figura 5-36: Carta de diseño para nivel de servicio/categoría del camino "D"
(Confiabilidad de diseño 50%)

5.5 Equivalencia de estructuras de pavimento: pavimento asfáltico tradicional vs pavimento de bloques asfálticos

Esta parte del trabajo presenta el procedimiento para establecer el espesor de un pavimento de bloques asfálticos que sea equivalente estructuralmente al de un pavimento flexible tradicional con capa de rodadura continua. Este procedimiento se considera importante ya que permite obtener el espesor de la base granular del pavimento de bloques a partir del diseño de un pavimento flexible y viceversa, garantizando que su comportamiento estructural sea equivalente, utilizando como criterio de diseño la deformación de la subrasante. El procedimiento contempló los siguientes pasos:

- Construcción de las cartas gráficas para el diseño de un pavimento flexible tradicional utilizando el programa EverStress.
- Programación de una hoja Excel que entrega el espesor de la base granular de los dos tipos de pavimento haciéndolos equivalentes en su comportamiento estructural. La hoja de Excel se puede consultar en el Anexo J.

La Figura 5-37 y Figura 5-38 presentan un ejemplo de las cartas de diseño para un camino tipo C y uno tipo D, para un tránsito de 500.000 ejes equivalentes de carga y un CBR de la sub-rasante de 6%.

Se observa que para una misma condición de tránsito y resistencia del suelo de sub-rasante, existe un espesor de base granular que permite obtener los mismos estados de deformación sobre la sub-rasante. Para el camino tipo C, el espesor de la base granular para un pavimento flexible tradicional es de 21,7 cm (aproximado a 22 cm) y su equivalente para un pavimento de bloques asfálticos es de 23,2 cm (aproximado a 24 cm). Para un camino tipo D, los espesores encontrados son: 21 y 22 cm respectivamente.

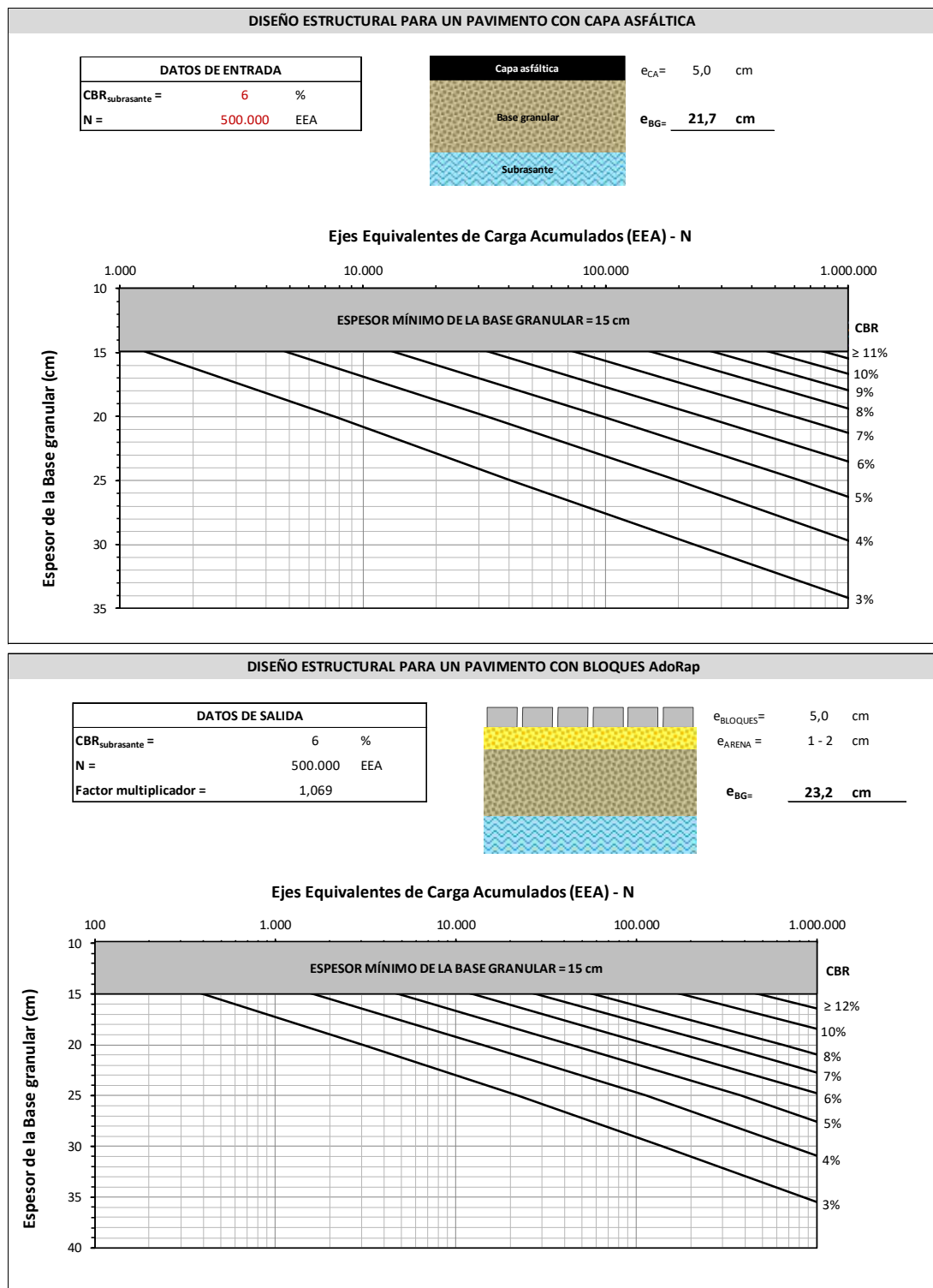


Figura 5-37: Cartas de diseño para caminos tipo C

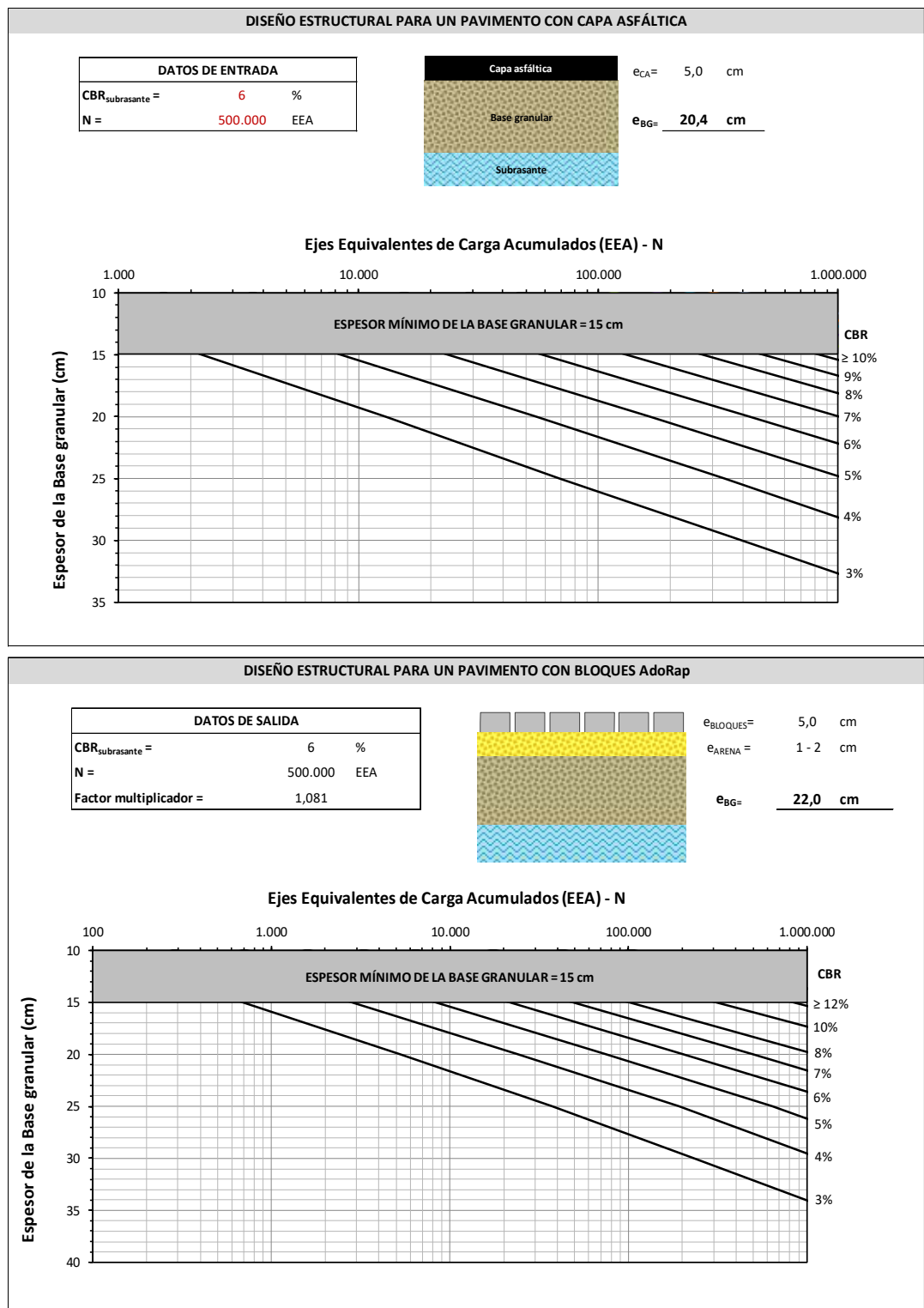


Figura 5-38: Cartas de diseño para caminos tipo D

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La investigación comprende varias etapas cuyo objetivo principal es diseñar un bloque de asfalto con empleo de material RAP para ser utilizado en pavimentos articulados. La investigación concluye que es posible construir pavimentos articulados con bloques de asfalto y propone un nuevo diseño de mezcla asfáltica, dimensiones específicas para el bloque y un procedimiento de diseño estructural. Las principales conclusiones de la investigación se presentan en los siguientes numerales:

6.1 Conclusiones asociado al estudio de mezclas asfálticas

La investigación desarrollada para mezclas asfálticas tenía como objetivo principal desarrollar un procedimiento de diseño de mezclas propio para la fabricación de bloques de asfalto incorporando material RAP. Las principales conclusiones son:

- Se desarrolló una metodología para el diseño de mezclas asfálticas en caliente para la fabricación de bloques de asfalto, empleando nuevos criterios de diseño, considerando que los criterios exigidos a las mezclas tradicionales no aplican a este tipo de solución. Los criterios propuestos para el diseño de mezcla son: resistencia a la tracción, sensibilidad a la humedad y los vacíos de aire.
- Para mezclas con RAP se propuso además, emplear el criterio de resistencia a la tracción directa comparando el diseño de las mezclas asfálticas con y sin incorporación de RAP. Este criterio permitirá incrementar el porcentaje de RAP controlando la fragilidad del bloque.
- Alternativamente, se investigó la aplicabilidad del ensayo de viga Semi-Circular (SCB) para ser utilizada como reemplazo del ensayo ITS. La configuración del ensayo simula de mejor forma las tensiones que se producirían en el bloque de

asfalto y se puede utilizar como control debido a que permite comparar el valor de tracción última de la probeta empleada en el diseño de la mezcla con el valor de tracción última de ensayos realizados directamente en el bloque de asfalto.

- Se determinó que el RAP aporta aproximadamente el 80% del asfalto residual y no el 100% como se contempla normalmente en los métodos de diseño de mezclas. Esto se puede explicar debido a que el RAP al ser recuperado en terreno es sometido a un proceso de fresado y si es re-procesado en planta, es sometido a un proceso de triturado, produciendo caras libres de asfalto que no tienen ningún aporte al asfalto óptimo de diseño. Se recomienda de acuerdo con los resultados obtenidos que se incremente la cantidad de asfalto virgen a incorporar en la nueva mezcla en un 0,2 – 0,3% y de esta manera compensar el asfalto que no aporta el RAP promoviendo una correcta envuelta de los agregados de la mezcla reciclada.
- La incorporación del máximo porcentaje de RAP no queda limitada por el procedimiento de diseño de mezcla sino que por las limitaciones tecnológicas existentes.

6.2 Conclusiones asociadas al diseño del bloque

La investigación asociada al diseño del bloque tenía por objetivo optimizar el diseño de bloque de asfalto construido sobre la base de mezcla asfáltica en caliente. Las principales conclusiones son:

- Considerando limitaciones impuestas por el empleo de mezclas en caliente y limitaciones propias asociadas a los recursos del proyecto de investigación, se estudiaron solo formas rectangulares.

- Respecto de las dimensiones del bloque se consideró simultáneamente tres criterios de diseño: peso máximo del bloque, espesor y dimensiones planas.
- El peso máximo se determinó en 4,5 kg por dos razones: que pudieran ser manipulados para su colocación de forma artesanal y que no produzca cansancio prematuro o daño físico a la persona que lo manipula.
- Se consideró un espesor de 5 cm basado en la experiencia y observación del comportamiento de pavimentos de asfalto para caminos de baja velocidad de proyecto que por lo general se especifican de 5 cm. Un espesor de 5 cm de capa de rodado exige una base granular de calidad equivalente a $CBR = 80\%$.
- Para las dimensiones planas, se estudió el área de carga dada por la impronta de un neumático considerando dos formas: circular y combinada (corresponde al área compuesta por un rectángulo central y dos semi-círculos laterales). Se propuso como hipótesis que el tamaño del bloque tuviera las mismas dimensiones planas que la impronta del neumático y así garantizar que el bloque no esté sometido a esfuerzos de tracción cuando la carga del neumático esté actuando parcialmente sobre este. Para la verificación del estado de tensiones se utilizó un programa de elementos finitos (EverFe 2.25). Basado en estas modelaciones y los criterios planteados se propusieron finalmente dos dimensiones: 20x20 cm y 25x15 cm.

6.3 Conclusiones asociadas al diseño estructural del pavimento articulado

La investigación asociada al diseño estructural de pavimentos articulados con bloques de asfalto tenía como objetivo proponer un método de diseño estructural simple sobre la base de cartillas de diseño. Para la elaboración de las cartillas de diseño se utilizó el programa EverStress FE basado en elementos finitos y la herramienta matemática de las diferencias divididas de Newton.

- A través de mediciones de terreno con equipo FWD y empleo de programa de multicapa se retro-calculó el módulo elástico equivalente o efectivo del pavimento articulado.
- Se propusieron cartas gráficas para el diseño de pavimentos articulados con bloques de asfalto según dos tipos de caminos (C y D) de acuerdo con las funciones de transferencia propuestas por el Método Sudafricano para el diseño de pavimentos flexibles. Estas cartas permiten soluciones continuas de espesor de base granular para garantizar un número de ejes equivalentes requerido. También se propusieron cartas de diseño que relacionan los espesores equivalentes de un pavimento articulado de bloques de asfalto y un pavimento de asfalto tradicional, lo que permite diseñar estructuras equivalentes para un mismo número de repeticiones de carga.
- Independientemente de la forma del bloque y el patrón de colocación empleado, los módulos elásticos retro-calculados de la capa de bloques son similares en magnitud, por lo que las respuestas estructurales no varían significativamente.

6.4 Conclusiones asociadas a la construcción (e industrialización)

Los objetivos de la investigación relacionada con la construcción fueron básicamente dos. Primero investigar la mejor forma de producir el bloque de asfalto a partir de la producción de una mezcla en caliente en planta y segundo realizar un “benchmarking” de la ingeniería asociada a la construcción de bloques de hormigón para no re-inventar procedimientos. Se estudiaron las siguientes alternativas para la fabricación del bloque:

- En laboratorio: Mediante un molde de un solo bloque. La mezcla fue compactada utilizando una prensa tradicional de laboratorio para rotura de cilindros de hormigón. Si bien, se reconoce que es una alternativa para producir bloques

individuales y analizarlos en laboratorio, es limitada en cuanto a producción en masa haciendo el procedimiento menos productivo.

- En laboratorio: Utilizando un molde multi-bloques. Para la compactación de las mezclas se utilizó un martillo neumático adaptado con una base plana y rígida. Este sistema es más promisorio que el empleo de un solo molde pero tiene aspectos considerados críticos para alcanzar bloques con propiedades homogéneas en cuanto a su densificación, vacíos en la mezcla y dimensiones geométricas, especialmente la altura del bloque.
- En terreno: Un método no convencional de producción de bloques que contempla la construcción de una capa continua de asfalto de forma tradicional como si fuera un pavimento flexible. Posteriormente al marcado de la superficie, se hace un corte con el tamaño del bloque requerido. De esta manera, se garantiza una producción en masa de los bloques, mejorando la productividad, reduciendo incertidumbres de producción y posiblemente disminuyendo la variabilidad en el producto final (Esto último deberá verificarse en una investigación posterior). Tiene la ventaja que se puede utilizar el mismo equipamiento y espacio físico dentro de la misma planta de asfalto como cancha de trabajo para industrializar el proceso de producción. Esta fue la metodología empleada en esta investigación.
- El procedimiento de construcción tradicional utilizado para los pavimentos articulados con adoquines se puede emplear para la construcción de este tipo de pavimentos pero con bloques de asfalto. El espesor de la cama de arena no debe sobrepasar los 2 cm compactos debido al espesor del bloque de asfalto. Un espesor de arena mayor podría producir el efecto colchón volviendo el bloque vulnerable a la fractura ante la solicitación de una carga.

6.5 Conclusiones generales

- El proceso de industrialización de los bloques se puede realizar utilizando el método no convencional seguido en esta investigación. No obstante, debe mejorarse tecnificando el proceso de prefabricación para garantizar las tolerancias mínimas requeridas para elementos prefabricados y de esta manera facilitar el terminado de la superficie de rodado con buena calidad.
- El diseño de la mezcla con RAP, requiere de una evaluación lo más exacta posible de la gravedad específica total de los agregados del RAP, debido a que afecta directamente las propiedades volumétricas de las mezclas. Una mala determinación o un criterio mal empleado puede dar la posibilidad de rechazar una mezcla con buenas características o aceptar otra que no cumple con los requerimientos de diseño y desempeño.
- Se validó la herramienta del polígono de vacíos (Polyvoids) para pre-determinar el contenido óptimo de asfalto. Esta herramienta permite ahorros no solo en el tiempo de ejecución del diseño sino también en el material empleado en laboratorio.
- El principal congreso de pavimentos articulados, SEPT (Small Element Pavement Technologists), el cual ha recibido cientos de trabajos publicados, no incluye tan siquiera un artículo sobre pavimentos con bloques de asfalto. El evento se enfoca solamente en bloques de hormigón y no reconoce la alternativa del bloque de asfalto como posible solución de pavimentación. Este trabajo demostró que los bloques de asfalto son una alternativa para varias aplicaciones de pavimentación.
- La incorporación de esta alternativa de pavimentación a la industria es un aporte a la práctica debido a que existe un interés por parte de los gobiernos y la industria del asfalto por incorporar productos nuevos o de reciclado, y que tengan un aporte a la sustentabilidad (reducción del consumo energético y de las emisiones de gases de efecto invernadero).

6.6 Recomendaciones

- Se recomienda investigar el uso de agentes rejuvenecedores y ablandadores para ser empleados en mezclas con altas incorporaciones de RAP ($> 25\%$) y estudiados en mezclas para bloques.
- Se recomienda el fraccionamiento del RAP como buena práctica para el diseño y construcción de las mezclas asfálticas que lo incorporen. De esta forma se promueve un mejor control de la variabilidad de este material.
- El estudio no consideró la evaluación de la resistencia al deslizamiento debido a que el tipo de granulometría y materiales utilizados para las mezclas del bloque son los mismos que los empleados en Chile para una capa de rodadura, las cuales cumplen con este requerimiento. La velocidad de operación vehicular sobre este tipo de pavimentos debe estar restringida para un rango máximo de 50 – 60 Km/h. De esta forma, el requerimiento de resistencia al deslizamiento queda controlado. No obstante, se recomienda investigar sobre los cambios en la fricción entre neumático y superficies con mezclas asfálticas recicladas para distintos contenidos de RAP.
- El módulo elástico de la capa de bloques de asfalto fue de 2300 MPa. Este valor podría incrementarse con el tiempo debido al paso de los vehículos produciendo un efecto de trabado o “lock up” entre bloques. Se recomienda medir el módulo en el tiempo para ajustar el módulo de diseño de esta capa. Esto debe realizarse en una nueva etapa de investigación
- Para la producción industrializada del bloque, se propone la construcción de una cancha o pista permanente totalmente mecanizada en el mismo sitio donde se localiza una planta de asfalto de mezclas en caliente, preferiblemente una planta tipo Batch. La construcción de la cancha incluye un radier de hormigón como superficie, una lámina de acero con hendiduras marcadas con el tamaño del bloques para guiar el disco de corte y una regla tipo molde que tiene dos funciones: marcar

el tamaño del bloque y contener el disco de corte. Esta metodología permitiría el uso de equipos tradicionales de asfalto (terminadora y compactadores) con la ventaja que se encontrarían a “pasos” de la fuente de producción de mezcla. El detalle de esta solución está fuera del alcance de esta investigación.

- Se constató en terreno que el almacenamiento del bloque es un factor crítico para garantizar un buen estado del bloque y evitar que se fracture. Se requiere diseñar el proceso de almacenamiento.

7. BIBLIOGRAFÍA

- 123RF. (s.f). *Adoquines*. Retrieved Abril 2016, from <http://es.123rf.com/imagenes-de-archivo/adoquines.html>
- 360° urban. (2011, Diciembre 1). *Heavy Duty pavements*. Retrieved Septiembre 2014, from <http://360urban.co.nz/lounge/2011/12/heavy-duty-pavements/>
- Abdelgalil, A., & Nor, H. (2014, February). The Effect of Joint on Structural Performance of Asphalt Block Pavements. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(8), 1612-1617.
- Ahmed, M., & Singhi, B. (2013). Overview on Structural behaviour of Concrete Block Pavement. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(7), 782-789.
- Alaska Pavement Summit. (2007, December 4th). Hot Mix Asphalt Recycling. Anchorage, AK.
- Al-Qadi, I., Aurangzeb, Q., Carpenter, S., Pine, W., & Trepanier, J. (2012). *Impact of high RAP content on structural and performance properties of asphalt mixtures*. Research Report FHWA-ICT-12-002, Illinois Center for Transportation.
- Al-Qadi, I., Carpenter, S., Roberts, G., Ozer, H., Aurangzeb, Q., Elseifi, M., & Trepanier, J. (2009). *Determination of Usable Residual Asphalt Binder in RAP*. Research Report ICT-09-031, Illinois Center for Transportation.
- Al-Qadi, I., Elseifi, M., & Carpenter, S. (2007). *Reclaimed asphalt pavement: a literature review*. Illinois Center for Transportation, Urbana, Illinois, USA.
- Anderson, M., & Murphy, T. (2004). Laboratory Mix Design Using RAP: Determining Aggregate Properties. *Asphalt Magazine*, 22-25.
- Armijos, V. (2011, Marzo). Estudio del Diseño Estructural y Constructivo de Pavimentos Articulados en Base a Bloques de Asfalto. *Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería*. Santiago de Chile, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Armitage, R. (1988). *Concrete Block Pavement Evaluation With The Falling Weight Deflectometer*. Retrieved Noviembre 2014, from Third International Conference On Concrete Block Paving: <http://www.sept.org/techpapers/119.pdf>
- Austrroads. (2002). *Austrroads framework for specifying asphalt*. Sydney.

- Austroroads. (2013). *Maximising the re-use of reclaimed asphalt pavement: Binder blend characterization*.
- Austroroads. (2015). *Maximizing the Re-use of Reclaimed Asphalt Pavement. Outcomes of Year Two: RAP Mix Design*. Technical Report.
- Bardasano, R. (2014, Enero 29). *PaveIng-el asombroso mundo de la ingeniería de pavimentos*. Retrieved Noviembre 2014, from El origen del deflectómetro de impacto: <http://paveing.blogspot.com/2014/01/el-origen-del-deflectometro-de-impacto.html>
- Bennert, T., & Maher, A. (2013, January 13-17). Forensic study on the cracking distress of New Jersey's LTTP SPS-5 sections-30% RAP vs virgin hot mix asphalt (HMA). *92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington D.C.
- Bennet, T., & Dongre, R. (2010). Backcalculation method to determine effective asphalt binder properties of recycled asphalt pavement mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(2179), 75-84.
- British Ports Association. (1982). *The structural design of heavy duty pavements for ports and other industries*.
- BSI. (2001). British Standard Institution, BS 7533-3:2001 - Pavement constructed with clay, natural stone or concrete pavers - part 3. Code of practice for laying precast concrete paving blocks and clay pavers for flexible pavements. London.
- Carpenter, S., & Wolosick, J. (1980). Modifier influence in the characterization of hot-mix recycled material. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 777, 15-22.
- Cement & Concrete Association of New Zealand and New Zealand Concrete Masonry Association Inc. (1988). *Interlocking Concrete Block Road Pavements (IB 67)*. New Zealand.
- Chandra, B., & Kumar, A. (2002a). Structural Behavior of Concrete Block Paving. I: Sand in Bed and Joints. *Journal of Transportation Engineering*, 128(2), 123-129.
- Chen, J., Chu, P., & Lin, K. (2007). Characterization of Binder and Mix Properties to Detect Reclaimed Asphalt Pavement Content in Bituminous Mixtures. *Canadian Journal of Civil Engineering*(34), 581-588.
- Claessen, A., Edwards, J., Sommer, P., & Uge, P. (1977). Asphalt pavement design-The Shell method. *4th International Conference Structural Design Asphalt Pavements*.
- Clark, A. (1979). *Water Penetration Through Newly Laid Concrete Block Paving*. UK: Cement and Concrete Association.

- Dirección de Vialidad - Ministerio de Obras Públicas Chile. (2015). Manual de Carreteras de Chile. 3, 573-574. Santiago de Chile.
- Direct INDUSTRY. (2016). *Pinzas de colocación de adoquines*. Retrieved Abril 2016, from <http://www.directindustry.es/prod/probst-gmbh/product-62557-475056.html>
- Distin, T., & Crabb, R. (2011). Turning RAP into a value added pavement asset. *14th International flexible pavements conference* (p. 15). Sydney: Australian Asphalt Paving Association.
- DOGGUIE. (s.f). *Curioso método para pavimentar las calles*. Retrieved Abril 2016, from <http://www.dogguie.net/curioso-metodo-para-pavimentar-las-calles/>
- Dowson, B. (1984). The effect of mix Design on the Durability. *2nd International Conference on Block Paving*. Delf.
- Dutruel, F., & Dardare, J. (1984). *Contribution to the study od structural behaviour of a concrete block pavement*. Delf, Netherland.
- Edward, J., & Valkering, C. (1974). Structural Design of Asphalt Pavement for Road vehicles-The Influence of High Temperatures. In *Highway and Road Construction* (Vols. 42, Part 1770).
- Eka, E., Kameswara, N., & Mannan, M. (2012). Evaluation of MODulus of Elasticity and Modulus od Subgrade Reaction of Soils Using CBR Test. *Journal of Civil Engineering Research*, 2(1), 34-40.
- Elwardany, M., & Daniel, J. (2011). Evaluation of high RAP content mixture resistance to moisture damage. *Annual meeting of northeast asphalt user producer group*.
- Escofet. (2014). *escofet*. Retrieved Septiembre 2014, from http://www.escofet.com/upload/descargas/huella%20_an%20%20innovative%20paving%20system.pdf
- FHWA. (2011). *Statistical Analysis of Performance of Recycled Hot-Mix Asphalt Overlays in Flexible Pavement Rehabilitation*. FHWA-HRT-11-051, Federal highway Administration, McLean.
- Gardiner, M., & Wagner, C. (1999). Use of Reclaimed Asphalt Pavement in SuperPave Hot-Mix Asphalt Applications. *Journal of the Transportation Research Board*(1681), 1-9.
- Han, J., Thakur, S., & Parsons, R. (2011). *Laboratory Evaluation of Characteristics of Recycled Aspahtl Pavement in Kansas*. Report No. K-TRAN: KU-09-2. FINAL REPORT, A cooperative transportation research program between Kansas

Department of Transportation, Kansas State University Transportation Center and The University of Kansas.

HANOVER. (s.f). *HANOVER. Architectural Products*. Retrieved August 2015, from <http://www.hanoverpavers.com/index.php>

Huang , B., Xiang, S., & Tang, Y. (2005). Comparison of Semi-Circular Bending and Indirect Tensile Strenght Test for HMA Mixtures. *Advance in Pavement Engineering. GSP-130, Geo-Frontiers Congress* , (pp. 1-12). Austin, Texas.

Huang, B., Li, G., Vukosavljevic, D., Shu, D., & Egan, B. (2005). Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement. *Transportation Research Record, 1929*, 37-45.

Huang, B., Zhang, Z., Kingery, W., & Zuo, G. (2004). fatigue crack characteristics of HMA mixtures containing RAP. *5th International RILEM conference on cracking in pavements*, (p. 8). Bagneaux, France.

Huang, J., & Bertholf, D. (1997). Effect of Photooxidation on Molecular Weight Distributions of Corbett Asphalt Fractions by Gel Permeation Chromatography. *Petroleum Science and Technology, 15*(1&2), 37-49.

Hunt, D. (s.f). *Overcoming Operating Challenges with Warm Mix Asphalt*. Retrieved July 2015, from http://www.warmmixasphalt.com/submissions/50_20080101_Dennis%20Hunt%20-%20Gencor.pdf.

ICCYC . (2013, Septiembre). Retrieved Septiembre 5, 2014, from Instituto Costaricense del Cemento y del Concreto, Ciclovia que ayuda a prevenir inundaciones por lluvia: <http://boletin-iccy.com/index.php?docId=132&secId=919>

ICPI. (2003). *Structural Design of Interlocking Concrete Pavement for Roads and Parking Lots*. TECH SPEC number 4, Interlocking Concrete Pavement Institute.

ICPI. (2014). *Interlocking Concrete Pavement Institute*. Retrieved Septiembre 2014, from <https://www.icpi.org/image/tid/41>

Jenkins, K. (2000, September). Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes With Emphasis on Foamed Bitumen. *Dissertation in fulfilment for degree Doctor of Philosophy*. University of Stellenbosch.

Karlsson, R., & Isacson, U. (2003). Application of FTIR-ATR to Characterization of Bitumrn Rejuvenator Diffusion. (ASCE, Ed.) *Journal of Materials in Civil Engineering, 15*(2), 157-165.

- Karlsson, R., & Isacsson, U. (2006). Material-related aspects of asphalt recycling-state-of-the-art. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(1), 81-92.
- Karlsson, R., Isacsson, U., & Ekblad, J. (2007). Rheological Characterisation of bitumen diffusion. *Journal of Materials Science*, 42, 101-108.
- Kim, Y., & Wen, H. (2002). Fracture Energy from Indirect Tension Testing. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, 71, 779-793.
- Knapton, J. (1976). The design of concrete block roads, Technical Report TRA 42515.
- Knapton, J., & Barber, S. (1982). *Research into concrete block pavement design*, *Concrete Works International*, 3, pp. 107-111. UK.
- Knapton, J., & O'Grady, M. (1983). *Concrete*, 17(8), 17-18.
- Koon, M., Zehra, A., & Shackel, B. (2000). Axisymmetric Finite Element Modeling of Block Pavement Subjected to Repeated Loading. *Transportation Research Record*, 53-63.
- Lee, N., Chou, C., & Chen, K. (2012). Benefits in Energy Savings and CO2 Reduction by Using Reclaimed Asphalt Pavement. *TRB Annual Meeting*.
- Lekso, S. (1981). Use of concrete block pavements for highways. *Precast Concrete*, 12(3), 112-114.
- Madrid, G. (2010, Noviembre 24). *CDT*. Retrieved Septiembre 5, 2014, from Corporación de Desarrollo Tecnológico, Cámara Chilena de la Construcción, Diseño y construcción de pavimentos de adoquín de hormigón: Múltiples aplicaciones y usos: <http://www.cdt.cl/2010/11/disen-y-construccion-de-pavimentos-de-adoquin-de-hormigon-multiples-aplicaciones-y-usos/>
- Madrid, G. (2010, Noviembre 24). Décima tercera conferencia tecnológica. *Aplicaciones de los pavimentos de adoquines*. Retrieved agosto 2015
- Marais, L. (1984). *Investigation into the load bearing capacity of SF concrete roadstones*. Portland Cement Institute, Johannesburg.
- Marshalls. (2015). *Creating Better Spaces*. Retrieved August 2015, from <http://www.marshalls.co.uk/commercial/block-paving/products/priora-machine-lay-90-rectangular-concrete-block-permeable-paving-webfa051170>
- Mazzonetto, C. (2011, Abril 13). *Infraestructura urbana*. Retrieved Agosto 2015, from <http://infraestructuraurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/13/concreto-permeavel-alternativa-para-aumentar-a-permeabilidade-de-pavimentos-254488-1.aspx>

- McDaniel, R., & Shah, A. (2003). Use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Under Superpave Specifications. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 72, 227-252.
- McDaniel, R., Kowalski, K., & Shah, A. (2012). *Evaluation of reclaimed asphalt pavements for surface mixtures*. Technical report, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- McDaniel, R., Shah, A., & Huber, G. (2012). *Investigation of Low- and high-temperature properties of plant-produced RAP mixtures*. Report Number FHWA-HRT-11-058, Turner-Fairbank Highway Research Center.
- McDaniel, R., Shah, A., Huber, G., & Copeland, A. (2013). Effects of Reclaimed Asphalt Pavement Content and Virgin Grade on properties of Plant Produced Mixtures. *Journal of Road Materials and Pavement Design*, 13, 161-182.
- McDaniel, R., Soleymani, H., Anderson, R., Turner, P., & Peterson, R. (2000). *Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method*. Transportation Research Board, Washington, DC, USA.
- McDaniel, R., Soleymani, H., Anderson, R., Turner, P., & Peterson, R. (2000). *Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the SuperPave Mixture Design Method*. NCHRP Final Report (9-12), Transportation Research Board, Washington D.C.
- McQueen, R., Knapton, J., Emery, J., & Smith, D. (2012). *Airfield Pavement Design With Concrete Pavers. A Comprehensive Guide*. ICPI-Interlocking Concrete Pavement Institute.
- Meng Chua, K., Askree, Z., & Shackel, B. (2002). Axisymmetric Finite Element Modeling of Block Pavement Subjected to Repeated Loading. *Transportation Research Record, Paper No. 00-0260(1730)*, 53-63.
- Mogawer, W., Austerman, A., & Roussel, M. (2011). Performance Characteristics of Asphalt Rubber Mixtures Containing RAP and Warm Mix Asphalt Technology. In N. A. Association (Ed.), *Second International Conference on Warm-mix Asphalt*. St Louis.
- Mogawer, W., Bennert, T., Daniel, J., Bonaquist, R., Austerman, A., & Booshehrian, A. (2012). Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 13(1), 183-208.
- Mohammad, L., Negulescu, I., Wu, Z., Daranga, C., Daly, D., & Abadie, C. (2003). Investigation of the use of recycled polymer modified asphalt binder in asphalt concrete pavements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 72, 551-594.

- Molenaar, A., Moll, H., & Houben, L. (1984). Structural Model for Concrete Block Pavements. *Transportation Research Record*(954), 16-27.
- Mollenhauer, K., & Gaspar, L. (2012, June 13-15). Synthesis of European Knowledge on asphalt recycling: options, best practices and research needs. *proceedings of the 5th Euroasphalt & Eurobitume congress*. Istanbul: European Bitumen Association, Brussels, Belgium.
- Morcillo, G. (2015, Abril). *Paren el mundo que me subo yo*. Retrieved Agosto 2015, from <http://parenelmundoquemesuboblogspot.cl/2015/04/baku-peninsula-abseron-gobustan.html>
- National Technology Development. (2009). *Quantify the Energy and Environmental Effects of Using Recycled Asphalt and Recycled Concrete for Pavement Construction*. Final Report 10629/C-08-02, Energy Research and Development Authority, New York State.
- Natural Resources Defense Council. (2011, june). *This Green Life*. Retrieved August 2015, from <http://www.nrdc.org/thisgreenlife/1106.asp>
- Ning, L., Chai-Pei, C., & Kuan-Yu, C. (2011, July 31). Benefits in Enerhy Savings and CO2 Reduction by Using Reclaimed asphalt Pavement. *Paper submitted to TRB 2012 Annual Meeting*. Retrieved Abril 2016, from <http://docs.trb.org/prp/12-1531.pdf>
- Noureldin, A., & Wood, L. (1987). Rejuvenator diffusion in binder film for hot-mix recycled asphalt pavement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1115, 51-61.
- OS Construcción. (2008). *Obras y Servicios del Uruguay*. Retrieved Enero 2016, from http://www.osusa.com.uy/ficha_obra.php?id=23
- Panda, B., & Ghosh, A. (2002). Structural behavior of concrete block paving I: San and bed and joints. *Journal of Transportation Engineering*, 128(2), 123-129.
- Panda, B., & Ghosh, A. (2002). Structural behavior of concrete block paving II: Concrete blocks. *Journal of Transportation Engineering*, 128(2), 130-135.
- Pell, P. (1978). *Developments in Highway Pavement Engineering-I*. England: Applied Science Publishers LTD.
- Pierre, P., Bresson, A., & Juneau, S. (2009, September 18-21). Deflection Basin Measurement and Seasonal Structural Behaviour of Interlocking Concrete Block Pavements in a Urban Northern Context. *9th International Conference on Concrete Block Paving*. Buenos Aires, Argentina.

- Potter, J., & Mercer, J. (1997). Full-scale performance trials and accelerated testing of hot-mix recycling in the UK. In I. S. Pavements (Ed.), *Eighth International Conference on Asphalt Pavements*, (pp. 593-607). Seattle.
- Powell, W., Potter, J., Mayhew, H., & Nunn, M. (1984). *The structural design of bituminous roads*. Laboratory Report, Transportation Road Research (TRRL), U.K.
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The Shell bitumen handbook*. London: 5th edition. Thomas Telford.
- Reddy, K., & Pandey, B. (1992). Performance Based Design Criteria for Flexible Pavements. *Indian Road Congress*, 53 (2), pp. 383-397.
- Roberts, F., Kandhal, P., Brown, E., Lee, D., & Kennedy, T. (1996). *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*. NAPA, Lanham.
- Roque, R., & Buttlar, W. (1992). The Development of a Measurement and Analysis System to Accurately Determine Asphalt Concrete Properties Using the Indirect Tensile Mode. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, 61, 304-328.
- Sampedro, A., Del Val, M., Gallego, J., Querol, N., & Del Pozo, J. (2012, Diciembre). Carbon Footprint of Recycled Hot-Mix Asphalt with High Rates of RAP. *Asfaltos y Pavimentos*(25), 12-22.
- Sánchez, F., Garnica, P., Iarreal, M., & López, D. (2011). Polyvoids: Analytical Tool for Superpave HMA Design. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(8), 1129-1137.
- SEPT- *Small Element Pavement Technologist*. (1980a). Retrieved Noviembre 2014, from <http://www.sept.org/techpapers/427.pdf>
- Shackel, B. (1980). *The performance of interlocking block pavements under accelerated trafficking*, 1 st International Conference Concrete Block Paving, (pp. 113-120). Newcastle.
- Shackel, B. (1986). Computer-aided design and analysis of concrete segmental pavements. *International Workshop on Interlocking Concrete Pavements*. Melbourne: Royal Melbourne Institute of Technology.
- Shackel, B. (1990). London: Design and construction of interlocking concrete block pavements, Elsevier Applied Science.
- Shackel, B. (2003). *The challenges of concrete block paving as a mature technology*, 7th Conference on Concrete Block Paving, (p. 52). Sun City, South Africa.

- Shackel, B., & Lim, D. (2003). Mechanism of Paver Interlock. *7th International Conference on Concrete Block Paving*. Sun City, South Africa.
- Shackel, B., & Pearson, A. (2014). *Concrete Flag Pavements Design and Construction guide*. Concrete Masonry Association of Australia, Artarmon, New Zeland.
- Shah, A., McDaniel, R., Huber, G., & Gallivan, V. (1998). Investigation of Properties of Plant-produced RAP mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 103-111.
- Shah, A., McDaniel, R., Huber, G., & Gallivan, V. (1998). Investigations of Properties of Plant-Produced Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures. *Transportation Reseach Record: Journal of Transportation Reseach Board*, 103-111.
- Shu, X., Huang, B., & Vukosavljevic, D. (2008). Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1323-1330.
- Soutsos, M., Tang, K., Khalid, H., & Millard, S. (2011). The effec of construction pattern and unit interlock on the strucutural behaviour of block pavements. *Construction and Building Materials*, 25, 3832-3840.
- TECNOGERMA. (s.f). *Optimas: Colocación de adoquines*. Retrieved Abril 2016, from <http://www.tecnoerma.es/maquinaria-prefabricados-hormig%C3%B3n/optimas/colocaci%C3%B3n-adoquines/>
- Texture Images. (2013, September). *Permeable block paving*. Retrieved August 2015, from <http://www.textureimages.net/blog/permeable-block-paving>
- Theyse, H. (1996). Overview of the South African Mechanistic Pavement Design Method. *Paper modified form the preprint presented at the 1996 annual meeting of the Transportation Research Board*. South Africa.
- Tighe, S., Chung, W., Burak, R., & Smith, D. (2006). Development of education tools for interlocking concrete pavement. *8th International Conference on Concrete Block Paving*, (pp. 535-543). San Francisco, California.
- Tran, N., Taylor, A., & Willis, R. (2012). *Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP and RAS contents*. National Center for Asphalt Technology.
- Unilock. (s.f). *Design considerations for interlocking concrete pavements*. Retrieved Septiembre 2014, from http://www.palumbo.biz/E_binder/11_CONCRETE_PAVERS/unilock/unilock_design_considerations.pdf

- Van de Ven, M., & Smit, A. (1997). Possibilities of a Semi-Circular Bending Test. *Proceedings Eighth International Conference on Asphalt Pavements* (pp. 939-950). Seattle: University of Washington.
- Van De Ven, M., Jenkins, K., voskuilen, J., & Van Den Beemt, R. (2007, June). Development of (half-) warm foamed bitumen mixes: state of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 8(2), 163-175.
- Van der Vlist, A. A. (1980). The development of concrete block in the Netherlands. *Proceeding 1st International Conference on Concrete Block Paving* (pp. 14-22). Newcastle: U.K.
- Villa de ladobe, J. (2014, Septiembre). *nodo noticias*. Retrieved Agosto 2015, from <http://nodonoticias.com/contenidos/las-cicloviass-en-puebla-caras-y-mal-hechas/>
- Virgilis, A. (s.f). *Prisma. Solucoes construtivas pré-fabricados de concreto*. Retrieved Agosto 2015, from Pavimento permeável contra precipitacoes: <http://www.revistaprisma.com.br/novosite/noticia.asp?cod=2943>
- Watson, D., Vargas-Nordbeck, A., Moore, J., Jared, D., & Wu, P. (2008). Evaluation of the use of reclaimed asphalt pavement in stone matrix asphalt mixtures. *Transportation research Record*(2051), 64-70.
- West, R., Michael, J., Turochy, R., & Maghsoodloo, S. (2011). A Comparison of Virgin and Recycled Asphalt Pavements Using Long-Term Pavement Performance SPS-5 Data. *Transportation Research Board 90th annual meeting* . Washington D.C.
- West, R., Timm, D., Willis, R., Powell, B., Tran, N., Watson, D., . . . Nelson, J. (2012). *Phase IV NCAT Pavement Test Track Findings*. National Center for Asphalt Technology.
- West, R., Willis, J., & Marasteanu, M. (2013). *Improved Mix Design, evaluation and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content*. Report Number NCHRP 752, National Center for Asphalt Technology, Auburn.
- Widyatmoko, I. (2008). 2008. *Journanstruction and Building Materials*(22), 77-87.
- Willis, J., Turner, P., Padula, F., Tran, N., & Julian, G. (2013). Effects of changing virgen binder grade and content on high reclaimed asphalt pavement mixture properties. *Transportation research Record*(2371), 66-73.
- Zaumanis, M., & Mallick, R. (2013). Finite Element Modelling of rejuvenator diffusion in RAP binder film-simulation of plant mixing process. *RILEM Conference*.

Zaumanis, M., & Mallick, R. (2015). Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(1), 39-55.

8 ANEXOS

Anexo A: Modelación de pavimentos articulados



Anexo B: Gestión de inventario y procesamiento del RAP



Anexo C: Cálculo de la gravedad específica total del agregado del RAP



Anexo D: Cálculo del contenido inicial (método del Instituto del Asfalto)



Anexo E: Diseños Marshall



Anexo F: Ensayos para las etapas de investigación (etapas 1 a 5)



Anexo G: Definición del tamaño del bloque de asfalto



Anexo H: Métodos para analizar los datos de deflexión



Anexo I: Análisis deflectométrico – retrocálculo de los módulos de las capas del pavimento



Anexo J: Propuesta de diseño estructural de un pavimento articulado con bloques de asfalto

