



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

**ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA EL ESTUDIO GRANULOMÉTRICO DE
ÁRIDOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ALVARO RENE ALVARADO VAZQUEZ

**PROFESOR GUÍA:
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CARLOS AGUILERA GUTIÉRREZ
GERARDO ECHEVERRÍA GÓMEZ**

**SANTIAGO DE CHILE
MARZO 2011**

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: ALVARO ALVARADO VASQUEZ.
FECHA: 14/03/2011
PROF. GUIA: Sr. FEDERICO DELFIN A.

"ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA EL ESTUDIO GRANULOMÉTRICO DE ÁRIDOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS"

El objetivo principal del tema de memoria es realizar un análisis comparativo, entre las metodologías chilenas y algunas extranjeras relacionadas a la especificación de granulometrías para mezclas asfálticas en caliente, con la intención de conocer los márgenes admisibles que podrían considerarse en la normativa tradicional, de modo que las gradaciones de áridos que se adopten, generen mezclas asfálticas que compatibilicen los aspectos constructivos, económicos y de desempeño en servicio del pavimento.

El sistema tradicional de bandas granulométricas expuesto en el Volumen 5 del Manual de Carreteras, presenta diferencias con respecto a algunas metodologías no tradicionales (SUPERPAVE, RAMCODES, método Bailey y normativa mexicana SCT) que actualmente se consideran como especificaciones validas para definir la granulometría de la mezcla. Para abordar este estudio comparativo se contempla la búsqueda de relaciones entre el grado de empaquetamiento de las mezclas y las granulometrías definidas según los distintos métodos, para distintos niveles de compactación. En esta etapa se llevó a cabo un programa experimental basado en la medición de probetas cilíndricas de mezclas asfálticas en caliente que difieren solamente en la banda granulométrica de áridos en estudio.

Entre los resultados se verifico que la granulometría de máxima densidad produce insuficientes vacíos en la mezcla asfáltica, así como que los puntos de control que impone SUPERPAVE, permiten una gama muy amplia de gradaciones que generan mezclas que no cumplen con los requisitos mínimos de estabilidad y vacíos. Además se encontró que la densificación por efecto de la compactación depende significativamente de la estructura granulométrica de la mezcla.

Se concluye que incorporar las restricciones de evitar la línea de máxima densidad y el cumplimiento de los requerimientos de los parámetros del método Bailey, a las bandas granulométricas tradicionales, permite obtener gradaciones de áridos que generan mejores propiedades. También se obtuvieron relaciones directas entre la compactación, la granulometría y las propiedades básicas de las mezclas asfálticas contempladas en este estudio, por lo que se recomienda comparar empíricamente la compactación Marshall, con la provocada por el mezclador giratorio de SUPERPAVE, el cual simula mejor las condiciones reales de compactación con rodillo.

Dedicatoria

A mis Padres, familiares y amigos
por haber apoyado este proceso
y a los docentes, estudiantes y trabajadores
quienes conforman lo más importante de la facultad.

Agradecimientos

A don Julio Torrejón Olmos (QEPD), quien fue el gestor de este tema de memoria y además profesor guía del mismo, le agradezco su apoyo y preocupación en la tarea de generar un trabajo de memoria de título que aporte al conocimiento de la disciplina.

A los profesores Federico Delfín, Carlos Aguilera y Gerardo Echeverría, por formar parte de la comisión de titulación y apoyar con su experiencia y conocimiento este trabajo.

Finalmente expresar mi gratitud a toda la sección de pavimentación del IDIEM incluido el laboratorio de mezclas asfálticas, por entregar las herramientas y conocimientos suficientes para lograr llevar a cabo el trabajo experimental de esta memoria.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1.....	8
1.1 Introducción.....	8
1.2 Objetivos	9
CAPITULO 2: MARCO TEORICO.....	10
2.1 Metodologías de gradación de áridos.....	10
2.1.1 Metodologías de tradicional para selección de áridos	10
2.1.2 Metodología SUPERPAVE	13
2.1.3 Método Bailey	18
2.1.4 Metodología RAMCODES.....	25
2.2 Metodologías para la dosificación.....	35
2.2.1 Procedimiento Marshall de dosificación	35
2.2.2 Procedimiento SUPERPAVE de dosificación	38
2.2.3 El polígono de vacíos RAMCODES	43
2.3 Análisis comparativo de bandas	46
CAPITULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL	52
3.1 Programa experimental	52
3.2 Caracterización de los materiales.....	58
3.3 Contenido de asfalto óptimo	63
3.4 Análisis de la compactación	69
CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
4.1 Conclusiones.....	75
4.2 Recomendaciones.....	77
BIBLIOGRAFIA.....	78
ANEXO A.....	80
ANEXO B.....	86
ANEXO C	90

TABLAS, GRAFICOS, FIGURAS Y ESQUEMÁS

Tabla 2.1: Requisitos para la fracción gruesa.	10
Tabla 2.2: Requisitos para la fracción fina.	10
Tabla 2.3: Granulometría del filler.	10
Tabla 2.4: Requisitos para la mezcla de agregados.....	11
Tabla 2.5: Granulometría densa.	11
Tabla 2.6: Granulometría semidensa.	11
Tabla 2.7: Granulometría gruesa.	12
Tabla 2.8: Granulometría abierta.	12
Tabla 2.9: Granulometría fina.	12
Tabla 2.10: Puntos de control y zona restrictiva.....	14
Tabla 2.11: Requerimientos angularidad agregados gruesos.	15
Tabla 2.12: Requerimientos angularidad.....	16
Tabla 2.13: Requerimientos partículas alargadas y planas.	17
Tabla 2.14: Requerimientos equivalente de arena.	17
Tabla 2.15: Tamices de control.....	18
Tabla 2.16: Rangos para los parámetros Bailey.....	23
Tabla 2.17: Requerimientos tradicionales para los VAM.	37
Tabla 2.18: Requerimientos SUPERPAVE de compactación.....	40
Tabla 2.19: Requerimientos SUPERPAVE de los VAM.	41
Tabla 2.20: Requerimientos SUPERPAVE de los VAF.	42
Tabla 2.21: Contenido de asfalto y Densidad máxima compactada..	45
Tabla 2.22: Contenido de asfalto y parámetros de vacíos.....	45
Tabla 2.23: Normativa mexicana de bandas granulométricas, transito liviano..	46
Tabla 2.24: Normativa mexicana de bandas granulométricas, transito pesado.....	47
Tabla 2.25: Bandas que no cumplen con los parámetros Bailey..	48
Tabla 2.26: Parámetros de la carta de gradación RAMCODES..	50
Tabla 3.1: Parámetros Bailey de las granulometrías experimentales..	56
Tabla 3.2: Granulometrías para ensayos, porcentaje que pasa cada tamiz..	57
Tabla 3.3: Fuentes de áridos utilizadas en los ensayos..	58
Tabla 3.4: Propiedades de áridos utilizadas en los ensayos.	58
Tabla 3.5: Propiedades del ligante usado en los experimentales.....	59
Tabla 3.6: Propiedades del ensaye de película delgada rotatoria..	59
Tabla 3.7: Propiedades de viscosidad.....	59
Tabla 3.8: Granulometría polvo de roca bajo tamiz N°8.....	60
Tabla 3.9: Granulometría polvo de roca bajo tamiz N°8.....	60
Tabla 3.10: Granulometría 1 teórica vs real.	61
Tabla 3.11: Densidad Real Seca del Material Grueso.....	61
Tabla 3.12: Densidad Real Seca del Material Fino..	62
Tabla 3.13: Densidad Real Seca del Material Fino..	62
Tabla 3.14: Requerimientos tradicionales para dosificación.....	63
Tabla 3.15: Requerimientos tradicionales para los VAM.	63
Tabla 3.16: Contenido óptimo de asfalto para la granulometría 1..	64

Tabla 3.17: Análisis de la dosificación para la mezcla 1.....	65
Tabla 3.18: Contenido óptimo de asfalto para la granulometría 3.....	66
Tabla 3.19: Análisis de la dosificación para la mezcla 3.....	66
Tabla 3.20: Contenido óptimo de asfalto para la granulometría 4.....	67
Tabla 3.21: Análisis de la dosificación para la mezcla 4.....	68
Tabla 3.22: Densidad máxima no compactada de cada mezcla ensayada.....	73
Grafico 2.1: Recomendación RAMCODES de buena gradación.....	28
Grafico 2.2: Banda granulométrica (n, D_{max}).....	29
Grafico 2.3: Representación punto-ámbito.....	30
Grafico 2.4: Carta de gradación RAMCODES.....	31
Grafico 2.5: Polígono de vacíos.....	45
Grafico 2.6: Comparación de bandas de transito pesado vs liviano.....	47
Grafico 2.7: Bandas que no cumplen con los parámetros Bailey.....	49
Grafico 2.8: Bandas granulométricas tradicionales.....	49
Grafico 2.9: Carta de gradación RAMCODES.....	51
Grafico 3.1: Granulometría experimental 1.....	52
Grafico 3.2: Granulometría experimental 2.....	53
Grafico 3.3: Granulometría experimental 3.....	54
Grafico 3.4: Granulometría experimental 4.....	55
Grafico 3.5: Granulometría experimental 5.....	56
Grafico 3.6: Comparación de las 5 granulometrías para ensayo.....	57
Grafico 3.7: Densidad vs compactación.....	69
Grafico 3.8: Estabilidad vs compactación.....	70
Grafico 3.9: Fluencia vs compactación.....	70
Grafico 3.10: Vacíos de aire vs compactación.....	71
Grafico 3.11: Vacíos en el agregado mineral vs compactación.....	72
Grafico 3.12: Vacíos llenos con asfaltos vs compactación.....	72
Grafico 3.13: Vacíos llenos con asfaltos vs cantidad de asfalto.....	73
Grafico 3.14: Absorción de agua de las mezclas ensayadas.....	74
Figura 2.1: Puntos de control y zona restrictiva.....	14
Figura 2.2: Ensayo angularidad agregado fino.....	16
Figura 2.3: Trabajabilidad vs parámetros RAMCODES.....	32
Figura 2.4: Ahuellamiento vs parámetros RAMCODES.....	33
Figura 2.5: Permeabilidad vs parámetros RAMCODES.....	33
Figura 2.6: Parámetros volumétricos de una mezcla asfáltica.....	38
Figura 2.7: Compactador giratorio.....	40
Esquema 3.1: Dosificación granulometría 1.....	64
Esquema 3.2: Dosificación granulometría 3.....	66
Esquema 3.3: Dosificación granulometría 4.....	67

CAPÍTULO 1

1.1. Introducción

La red vial chilena compuesta por 80.651 [Km] de los cuales sólo 16.967 [Km] se encuentran pavimentados, impacta directamente el desarrollo de variadas actividades económicas, siendo clave en el desarrollo de cada zona del territorio nacional. Su construcción y mantención involucran altos costos económicos, lo que hace indispensable profundizar los conocimientos acerca del comportamiento de los pavimentos y en particular de las mezclas asfálticas, a través de estudios teóricos y experimentales.

El trabajo se fundamenta en las diferencias que se presentan entre la práctica chilena (Manual de Carreteras) y las metodologías extranjeras (SUPERPAVE, RAMCODES, método Bailey y la normativa mexicana SCT), consideradas como metodologías aceptadas para la adecuada gradación de áridos para mezclas asfálticas.

La hipótesis del trabajo se basa que es posible complementar la normativa tradicional que prescribe las bandas granulométricas a utilizar, mediante las metodologías desarrolladas en los últimos años, para compatibilizar los aspectos constructivos con el comportamiento de los pavimentos en servicio. Por otro lado, se sabe que la gradación de áridos tiene influencia directa en las principales propiedades de una mezcla asfáltica para niveles de compactación óptimos, aspecto que servirá de base para el planteamiento del presente estudio.

El trabajo considera las siguientes etapas:

Estudio de las bases teóricas en que se basan los métodos de gradación de áridos para mezclas asfálticas.

Definición de las variables y ensayos, que permitirán validar las metodologías que se plantean como objetivo del presente trabajo.

Diseño del programa experimental que contemple evaluar las propiedades de las mezclas asfálticas confeccionadas con las distintas formulaciones granulométricas que interesa comparar, en función del nivel de compactación aplicado.

Determinación de los materiales a utilizar, cemento asfáltico y árido.

Desarrollo de la experticia de laboratorio para la realización de la serie de probetas que se consideran para el estudio.

Realización del programa experimental.

Análisis e interpretación de los resultados y a partir de estos, concluir a cerca del comportamiento de las mezclas asfálticas para las variables de granulometría, compactación y contenido de asfalto, con el objetivo de realizar recomendaciones a la normativa tradicional.

1.2 Objetivos

Objetivo General

Realizar un análisis comparativo entre el método tradicional chileno para definir la granulometría de una mezcla asfáltica y tres métodos que forman parte de las prácticas internacionales utilizadas para optimizar la estructura granulométrica de las mezclas.

Objetivos Específicos

Caracterizar los métodos utilizados actualmente en Chile para la gradación de áridos en mezclas asfálticas y las metodologías propuestas en Estados Unidos correspondientes a:

- SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement System), Referencia bibliográfica 9.
- Método Bailey, Referencia bibliográfica 5.
- RAMCODES (Rational Methodology for Compacted geomaterial Densification and Strength analysis), Referencia bibliográfica 10.
- Normativa Mexicana SCT, Referencia bibliográfica 8.

Analizar la factibilidad de incorporar las disposiciones utilizadas en los métodos mencionados en el párrafo anterior, a la práctica chilena de gradación de áridos.

Realizar algunas experiencias de laboratorio, diseñando mezclas de áridos de acuerdo a los métodos tradicionales y no tradicionales, para con estas gradaciones ensayar probetas de mezclas asfálticas que permitan verificar comparativamente las distintas propiedades de estas mezclas.

CAPÍTULO 2: MARCO TEORICO

2.1 Metodologías de gradación de áridos para mezclas asfálticas

2.1.1 Metodología tradicional chilena para selección de áridos

Caracterización de los áridos

Los requerimientos para los áridos utilizados en mezclas asfálticas en caliente están establecidos en el volumen 5 del Manual de Carreteras en la sección 5.408.201. Se distingue la fracción gruesa (retenida en tamiz 2,5 [mm], ASTM N°8) y la fracción fina (que pasa por tamiz 2,5 [mm], ASTM N°8). La fracción gruesa deberá estar constituida por partículas chancadas, tenaces, y libres de materia orgánica, arcilla o materias extrañas, siendo sus requisitos resumidos en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Requisitos para la fracción gruesa.

ENSAYE	TIPO DE MEZCLA ASFALTICA				METODO
	RODADURA	INTERMEDIA	BASE		
			GRUESA	ABIERTA	
Desgaste Los Ángeles (máx.)	25% (1)	35%	35%	30%	8.202.11 (LNV 75)
Desintegración en Sulfato de Sodio (máx.)	12%	12%	12%	12%	8.202.17 (LNV 74)
Partículas Chancadas (mín.)	90%	70%	60%	90%	8.202.6 (LNV 3)
Partículas Lajeadas (máx.)	10%	15%	15%	10%	8.202.6 (LNV 3)
Adherencia Método Estático (mín.)	95%	95%	95%	95%	8.302.29 (LNV 9)

1) El Proyecto podrá especificar otro valor de desgaste de Los Ángeles, debidamente justificado, el cual no podrá superar el 35%.

La fracción fina estará constituida por partículas que deberán ser duras, tenaces y libres de arcilla o sustancias perjudiciales, siendo además necesario que cumplan con los requerimientos resumidos en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Requisitos para la fracción fina.

ENSAYE	TIPO DE MEZCLA ASFALTICA				METODO
	RODADURA	INTERMEDIA	BASE		
			GRUESA	ABIERTA	
Índice de Plasticidad	NP	NP	NP	NP	8.102.4 (LNV 90)
Adherencia Riedel – Weber	Mín. 0 – 5	Mín. 0 – 5	Mín. 0 – 5	Mín. 0 – 5	8.302.30 (LNV 10)
Desintegración Sulfato de Sodio máx.	15%	15%	15%	15%	8.202.17 (LNV 74)

Si la granulometría requiere filler, este debe estar constituido por polvo mineral fino tal como cemento hidráulico, cal u otro material inerte de origen calizo, libre de materia orgánica y partículas de arcilla, cumpliendo con la banda granulométrica que se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Granulometría del filler.

Tamices		% que pasa en peso
[mm]	ASTM	
0,63	(N° 30)	100
0,315	(N° 50)	95 – 100
0,08	(N° 200)	70 – 100

La combinación de los áridos (fracción gruesa y fina), debe además cumplir con los requerimientos que se presentan en la tabla 2.4.

Tabla 2.4: Requisitos para la mezcla de agregados.

ENSAYE	TIPO DE MEZCLA ASFALTICA				METODO
	RODADURA	INTERMEDIA	BASE		
			GRUESA	ABIERTA	
Sales Solubles (máx.)	2%	3%	3%	3%	8.202.14 (LNV 8)
Equivalente de Arena (mín.)	50%	45%	40%	50%	8.202.9 (LNV 71)

Bandas granulométricas

A continuación se presentan las bandas granulométricas que se deben cumplir de acuerdo a las solicitudes de tránsito y que según su tipo entregan distintas texturas superficiales. Las bandas granulométricas del tipo IV, son las únicas que no tienen limitaciones para tránsito pesado y específicamente las bandas IV-A-12 y IV-A-20 son las más utilizadas para carpetas asfálticas de superficie.

Tabla 2.5: Granulometría densa.

Denominación		IV - 10 (1)	IV - 12 (2)	IV - 20 (2)
Tamices		% que pasa en peso		
[mm]	ASTM			
25	(1")			100
20	(3/4")		100	80 - 100
12,5	(1/2")	100	80 - 100	-----
10	(3/8")	80 - 100	70 - 90	60 - 80
5	(Nº 4)	55 - 75	50 - 70	48 - 65
2,5	(Nº 8)	35 - 50	35 - 50	35 - 50
0,63	(Nº 30)	18 - 29	18 - 29	19 - 30
0,315	(Nº 50)	13 - 23	13 - 23	13 - 23
0,16	(Nº 100)	8-16	8-16	7-15
0,08	(Nº 200)	4-10	4-10	0-8

(1) La banda IV-10 sólo podrá utilizarse para ciclo vías.

(2) Estas bandas se utilizarán cuando sobre ellas se coloque una mezcla drenante u otra de similares características.

Tabla 2.6: Granulometría semidensa.

Denominación		IV - A - 12	IV - A - 20
Tamices		% que pasa en peso	
[mm]	ASTM		
25	(1")		100
20	(3/4")	100	80 - 95
12,5	(1/2")	80 - 95	65 - 80
10	(3/8")	70 - 85	57 - 73
5	(Nº 4)	43 - 58	40 - 55
2,5	(Nº 8)	28 - 42	28 - 42
0,63	(Nº 30)	13 - 24	13 - 24
0,315	(Nº 50)	8-17	8-17
0,16	(Nº 100)	6-12	6-12
0,08	(Nº 200)	4-8	4-8

Tabla 2.7: Granulometría gruesa.

Denominación		III -10	III -12a	III -12b	III -20
Tamices		% que pasa en peso			
[mm]	ASTM				
25	(1")				100
20	(3/4")		100	100	75 - 100
12,5	(1/2")	100	75 - 100	75 - 100	-----
10	(3/8")	75 - 100	60 - 85	60 - 85	45 - 70
5	(Nº 4)	35 - 55	35 - 55	30 - 50	30 - 50
2,5	(Nº 8)	20 - 35	20 - 35	20 - 35	20 - 35
0,63	(Nº 30)	10-22	10-22	5-20	5-20
0,315	(Nº 50)	6-16	6-16	3-12	3-12
0,16	(Nº 100)	4-12	4-12	2-8	2-8
0,08	(Nº 200)	2-8	2-8	0-4	0 - 4

Tabla 2.8: Granulometría abierta.

Denominación		II -5	II -10	II -12	II -20	II -25
Tamices		% que pasa en peso				
[mm]	ASTM					
40	(1 1/2")					100
25	(1")				100	70 - 100
20	(3/4")			100	70 - 100	50 - 80
12,5	(1/2")		100	70 - 100	-----	-----
10	(3/8")	100	70 - 100	45 - 75	35 - 60	25 - 50
5	(Nº 4)	40 - 85	20 - 40	20 - 40	15 - 35	10-30
2,5	(Nº 8)	5-20	5-20	5-20	5-20	5-20
0,08	(Nº 200)	0 - 4	0 - 4	0 - 4	0 - 4	0 - 4

Tabla 2.9: Granulometría fina.

Denominación		V - 10	V - 12
Tamices		% que pasa en peso	
[mm]	ASTM		
20	(3/4")		100
12,5	(1/2")	100	85 - 100
10	(3/8")	85 - 100	-----
5	(Nº 4)	65 - 80	65 - 80
2,5	(Nº 8)	50 - 65	50 - 65
1,25	(Nº 16)	37 - 52	37 - 52
0,63	(Nº 30)	25 - 40	25 - 40
0,315	(Nº 50)	18 - 30	18 - 30
0,16	(Nº 100)	10-20	10-20
0,08	(Nº 200)	3-10	3-10

2.1.2 Metodología SUPERPAVE

Dentro del análisis de la gradación de áridos, SUPERPAVE utiliza la gráfica de Fuller, la cual representa en el eje de las ordenadas el porcentaje de áridos que pasa y teniendo como abscisa, la abertura de los tamices de la serie normal elevado al exponente n , lo cual representa la curva granulométrica. La ecuación se describe a continuación:

$$p_i = \left(\frac{D_i}{D_{\max}} \right)^n$$

Donde:

p_i = % acumulado que pasa, para el tamiz de diámetro D_i .

D_i = diámetro del tamiz

D_{\max} = tamaño máximo del material

n = valor asociado a la forma de la curva

Con esta representación la graduación de agregados para una mezcla asfáltica se puede expresar por un par de números, esto es, un coeficiente de forma (n) y el tamaño máximo (D_{\max}). La experiencia sugiere que mezclas asfálticas con n cercano a 0.45 pueden llegar al máximo de su densificación cuando se compactan, sin embargo, la curva de máxima densificación es evitada porque produciría inaceptablemente bajos valores de vacíos en el agregado mineral VMA, lo que provocaría muy poco espacio para producir una película de asfalto lo suficientemente gruesa para proporcionar el grado de cohesión a la mezcla. Esta curva corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100%, hasta el origen (0%, 0 mm).

La importancia de usar la gráfica de Fuller, es que facilita la expresión y manejo de la graduación, de las especificaciones granulométricas y hasta la definición de la buena graduación y el potencial de densificación de la mezcla.

Este método para evaluar la variabilidad de una granulometría aventaja al método tradicional de tolerancias de mallas individuales pues aquel considera a la graduación de manera integral; las tolerancias individuales introducen de por sí un sesgo muy significativo.

Existe relación entre los parámetros D_{\max} y n con la trabajabilidad. En el ámbito de las graduaciones de SUPERPAVE, la facilidad de manejo y colocación aumenta a medida que las mezclas tienen a la vez tamaño máximos más pequeños y estructuras más densas. Una mezcla densa y otra abierta tienen significativamente diferentes trabajabilidades para un mismo tamaño máximo, siendo más segregables las mezclas abiertas.

Requerimientos SUPERAVE.

Para que una distribución granulométrica cumpla los requerimientos SUPERPAVE, la curva correspondiente debe pasar entre los puntos de control especificados y dejando excluida una zona entre los tamices N° 4 y N°50. La zona restringida es una especificación que se ha puesto en duda ultimamente debido a que es redundante si se cumplen con los requerimientos de angularidad para los agregados finos. Esta zona puede ser utilizada para catalogar una graduación entre fina (curvas granulométricas que pasan sobre la zona restringida) y gruesa (curvas granulométricas que pasan debajo de la zona restringida). Sin embargo, si no se

conociera la propiedad de la angularidad del agregado fino, cumplir con evitar la zona restringida sería apropiado.

La tabla 2.10 muestra las especificaciones de los puntos de control y de la zona restringida, según los tamaños máximos nominales de la mezcla de áridos.

Tabla 2.10: Puntos de control y zona restrictiva.

Tamiz		Puntos de control (porcentaje que pasa)				
		Tamaño máximo nominal (ASTM)				
		3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"
ASTM	[mm]					
2"	50					100
1 1/2"	40				100	90-100
1"	25			100	90-100	
3/4"	20		100	90-100		
1/2"	12,5	100	90-100			
3/8"	10	90-100				
N° 8	2,5	32-67	28-58	23-49	19-45	15-41
N° 200	0,08	2,0-10,0	2,0-10,0	2,0-8,0	1,0-7,0	0,0-6,0
Tamiz		Zona restrictiva (porcentaje que pasa)				
ASTM	[mm]					
N° 4	5				39,5	34,7
N° 8	2,5	47,3	39,1	34,6	26,8-30,8	23,3-27,3
N° 16	1,25	31,9-37,6	25,6-31,6	22,3-28,3	18,1-24,1	15,5-21,5
N° 30	0,63	23,5-27,7	19,1-23,1	16,7-20,7	13,6-17,6	11,7-15,7
N° 50	0,315	18,4	15,5	13,7	11,4	10

A continuación se muestra la carta de gradación en la gráfica de Fuller (apertura de tamices elevado a la potencia 0.45, a pesar de que en la representación gráfica en el eje de las abscisas se escriban simplemente el tamaño del tamiz) y con la inclusión de las restricciones del método SUPERPAVE, para un tamaño nominal máximo de 9,5 [mm].

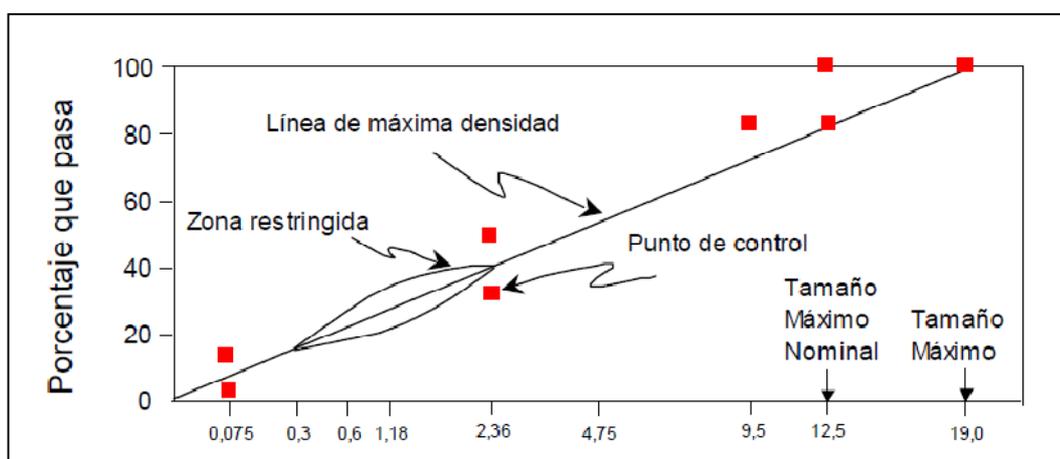


Figura 2.1: Puntos de control y zona restrictiva.

Métodos de caracterización de los agregados

La investigación del SHRP (strategic highway research program), no sólo entrego los requerimientos para la forma de diseño de la estructura del árido (granulometría), sino que también entrega requisitos para las propiedades de los áridos.

Los ensayos a los áridos están especificados para dos grupos de propiedades: de consenso y de origen.

De consenso

Estas propiedades son llamadas de consenso ya que deben ser ampliamente cumplidas para asegurar un buen desempeño de la mezcla asfáltica en caliente fabricada con estos áridos. Además dependen del nivel de tráfico que tiene el proyecto para el cual se usara la mezcla asfáltica (ESAL, Equivalent Single Axle Load) y de la disposición de estos en la estructura de pavimento.

- Angularidad del árido grueso

Esta propiedad asegura el grado de fricción interna de los áridos mayores al tamaño de la malla N⁴, además de la resistencia a las cargas de tráfico. Las diferencias con la metodología tradicional (método 8.202.6, M.C.) son la dependencia de los requerimientos con la intensidad del tráfico y la definición de partículas chancadas como aquella en que el área de las caras fracturadas debe ser mayor al 25% del área superficial. Los requerimientos son para el porcentaje de partículas con 1 y 2 caras fracturadas y son presentados en la tabla 2.11.

Tabla 2.11: Requerimientos angularidad áridos gruesos.

Tráfico en millones de ESALs	Profundidad	
	< 100 [mm]	>100 [mm]
< 0,3	55/-	-/-
< 1	65/-	-/-
< 3	75/-	50/-
< 10	85/80	60/-
< 30	95/90	80/75
< 100	100/100	95/90
≥ 100	100/100	100/100

Nota: "85/80" significa que el 85% de los áridos gruesos tiene por lo menos 1 cara fracturada y el 80% tiene 2 o más caras fracturadas.

- Angularidad del agregado fino (AASHTO TP 33)

Esta es una caracterización que no es requisito en la metodología tradicional (Manual de Carreteras). Establece la medida de angularidad de los agregados finos menores a la malla N⁸ a través de los vacíos, de modo que un contenido bajo de vacíos indica una alta angularidad, menos partículas esféricas y mayor cantidad de partículas rugosas. El método consiste en llenar un recipiente calibrado de un volumen con arena de 100 [cm³], con una muestra de áridos finos que fluye a través de un embudo, para caer sobre el mismo cilindro

como se aprecia en la figura 2.2. El exceso de material se quita y se registra el peso del árido no compactado como F.

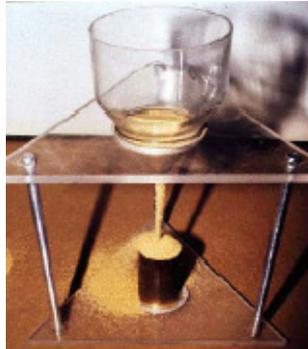


Figura 2.2: Ensayo angularidad agregado fino.

Finalmente los vacíos sin compactar de la fracción fina se determinan de acuerdo a la siguiente expresión:

$$U = \frac{V - (F/G)}{V} * 100$$

Donde:

V= Volumen del cilindro

F= Masa neta del agregado

G= Densidad relativa seca (gravedad específica) del agregado fino

U= Vacíos sin compactar en el material en %.

Los requerimientos para esta propiedad se resumen en la tabla 2.12.

Tabla 2.12: Requerimientos angularidad.

Tráfico en millones de ESALs	Profundidad	
	< 100 [mm]	>100 [mm]
< 0,3	-	-
< 1	40	-
< 3	40	40
< 10	45	40
< 30	45	40
< 100	45	45
≥ 100	45	45

Nota: El criterio es presentado como % vacíos de aire en áridos finos ligeramente compactados

- Partículas alargadas y aplanadas (ASTM D4791)

Esta caracterización está referida a las partículas gruesas mayores a 5 [mm] y el procedimiento de obtención del porcentaje de partículas alargadas es similar al método tradicional descrito en el numeral 8.202.6 del Manual de Carreteras. Los requisitos dependen del nivel de tráfico y se presentan en la tabla 2.13.

Tabla 2.13: Requerimientos partículas alargadas y planas.

Tráfico en millones de ESALs	Porcentaje
< 1	No exige
≥ 1	10
Nota: El criterio es presentado como % máximo en peso de partículas alargadas y planas	

- Equivalente de arena (ASTM D2419)

Este ensayo tiene las mismas características que el utilizado tradicionalmente y que se describe en el numeral 8.202.9 del Manual de Carreteras. La diferencia con el método tradicional son la dependencia de los requerimientos con el nivel de tráfico del proyecto y que se resumen en la tabla 2.14.

Tabla 2.14: Requerimientos equivalente de arena.

Tráfico en millones de ESALs	Equivalente de arena mínimo
< 3	40
< 30	45
≥ 30	50

De origen

- El ensayo de desgaste de Los Ángeles (ASTM C131)

Esta prueba de medida de la degradación de los agregados minerales tiene el mismo procedimiento que el método tradicional descrito en el numeral 8.202.11 del Manual de Carreteras.

- Intemperismo acelerado (ASTM C88)

Este ensayo persigue medir la propiedad de sanidad de los áridos expuestos a la acción del intemperismo. El procedimiento es similar al tradicionalmente llamado desintegración en sulfato de sodio (8.202.17 M.C.).

- Materiales deletéreos (AASHTO T 11)

Este ensayo tiene como objetivo medir la presencia de materiales deletéreos o partículas que debilitan la adhesión entre el asfalto y las partículas de árido. En la especificación SUPERPAVE se mide el índice de azul de metileno en una muestra de áridos que pasa la malla N°200. El similar con el método tradicional es el ensayo de Adherencia Riedel-Weber (8.302.30 M.C.), el cual tiene un procedimiento y requerimientos distintos pero que busca medir la misma propiedad.

2.1.3 Método Bailey

La metodología Bailey busca una granulometría óptima a partir de fracciones de áridos gruesos, finos y filler, tomando en consideración como variable de decisión el porcentaje deseado de la densidad no compactada que presenta cada fracción de áridos gruesos y el porcentaje que pasara la malla N°200 de la granulometría final obtenida. Para lograr esto, se deben realizar una serie de pasos de cálculos (que serán presentados más adelante), mediante la consideración de las densidades y vacíos aportados por cada fracción de áridos a la mezcla final. Finalmente la granulometría obtenida es aceptada, si cumple con los requisitos de 3 parámetros asociados a los tamices más representativos de la mezcla de áridos.

Conceptos

Partículas de tamaño máximo nominal (nominal maximum particle size, NMPS): corresponde a una medida mayor de tamiz con respecto al primer tamiz que retiene más de un 10% de los áridos. Tamiz medio (Half sieve)= $NMPS \cdot 0,5$. Control primario de tamices (primary control sieve, PCS) = $NMPS \cdot 0,22$, esta abertura divide los áridos en gruesos y finos. Control secundario de tamices (secondary control sieve, SCS) = $PCS \cdot 0,22$, esta abertura divide los áridos finos en arena gruesa y arena fina. Control terciario de tamices (tertiary control sieve, TCS) = $TCS \cdot 0,22$, esta abertura divide a su vez la arena fina en dos fracciones.

Estos valores deben ser aproximados a los tamices estandarizados por la ASTM, como se puede observar de la tabla 1 para distintas partículas de tamaño máximo nominal (NMPS).

Tabla 2.15: Tamices de control.

	NMPS [mm]					
	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75
Half Sieve	19	12.5	9.5	**	4.75	2.36
PCS	9.5	4.75	4.75	2.36	2.36	1.18
SCS	2.36	1.18	1.18	0.6	0.6	0.3
TCS	0.6	0.3	0.3	0.15	0.15	0.075

** El valor más cercano es el tamiz 4.75, sin embargo el valor más representativo es 6.25, por lo que se debe hacer una interpolación entre los tamices 9.5 y 4.75 [mm] para obtener el % que pasa.

Información previa:

Granulometría y contribución de cada fuente en % por volumen, Peso específico (bulk specific gravity, G_{sb}), densidad compactada y no compactada (Rodded and loose unit weights, según el método AASHTO T19) de cada fuente de agregados gruesos. La clasificación de las fuentes de áridos a usar, se determina de acuerdo al NMPS. Las fuentes de agregados gruesos deben tener un NMPS igual o superior a 9,5 [mm], la fuentes de agregados finos deben tener un NMPS igual o inferior a 4,75 [mm] y la fuente de mineral filler (MF) debe ser predominantemente de agregado menor al tamiz de 0,075 [mm].

Elección de parámetros para mezcla

1.- Elección de un porcentaje con respecto a la densidad no compactada para determinar la densidad elegida (chosen unit weight) de cada fuente de áridos gruesos. Este parámetro determina la fricción de la mezcla, aportada principalmente por la fracción gruesa. El rango de elección para graduación gruesa va de 95% a 105% (teniendo en cuenta que rodded unit weights \approx 110% loose unit weights). Para la elección se debe tener en cuenta la capacidad a la degradación de los áridos gruesos, acercándose al valor de 105% para áridos propensos a la abrasión. También se debe tener en cuenta que al aumentar este porcentaje, se aumenta el esfuerzo de compactación para construir la mezcla pero también se aumenta la fricción de la mezcla de áridos, lo que a su vez incrementa la estabilidad de la mezcla. Para mezclas de graduación fina este porcentaje debería ser menor a 90% para asegurar que el esqueleto de áridos gruesos de la mezcla sea predominantemente formado por la fracción fina de áridos.

2.- Elección del porcentaje que pasa el tamiz de 0,075 [mm] ($P_{0.075}$), con rango de 3,5% a 6%.

Cálculos para la determinación de la granulometría:

1.- Determinar la densidad elegida de cada fuente de áridos gruesos según:

$$CACUW = LUW \cdot DPLUW \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

Donde:

CACUW: coarse aggregate chosen unit weight (densidad elegida para cada fuente árido grueso)

LUW: loose unit weights (densidad no compactada de cada fuente de áridos gruesos)

DPLUW: desired percent of loose unit weight (porcentaje deseado de densidad no compactada)

Nota: En la fuente de áridos gruesos predomina la cantidad de áridos sobre el tamiz del control primario (PCS).

2.- Determinar la contribución a la densidad de la mezcla de cada fuente de agregados grueso según el volumen deseado.

$$CC_i = PCA \cdot CACUW$$

Donde:

CC_i : Contribución en porcentaje de la fuente i de áridos gruesos

PCA: percent coarse aggregate ($\sum PCA_i = 100\%$)

3.- Determinar los vacíos de cada fuente de áridos gruesos de acuerdo a su contribución.

$$V_i = \left(1 - \frac{CACUW}{G_{sb} \cdot 1000}\right) \cdot CC_i$$

V_i : Vacíos en la fuente i de áridos gruesos

G_{sb} : Peso específico de cada fuente de áridos gruesos.

Vaciós totales de las fuentes de agregados gruesos: $V_T = \sum V_i$

4.- Contribución a la densidad de la mezcla según el volumen deseado para cada fuente de áridos finos. Esta densidad de los finos llena los vacíos generados por la fracción gruesa V_T .

$$CF_i = FACUW \cdot PFA \cdot V_T.$$

Donde:

CF_i : Contribución en porcentaje de la fuente i de áridos finos

FACUW: fine aggregate chosen unit weight (densidad elegida cada fuente árido fino)=
fine aggregate rodded unit weight (densidad compactada cada fuente árido fino)

PFA: percent fine aggregate ($\sum PFA_i = 100\%$)

5.- Determinación de la densidad para el total de la mezcla.

$$UWB = \sum(CC_i + CF_i)$$

Donde:

UWB: Unit weight of blend (Densidad de la mezcla)

6.- Determinar el porcentaje inicial en peso de cada fuente de áridos (gruesa y fina) con respecto a la mezcla.

$$PWC_i = \frac{CC_i}{UWB} \text{ (Agregados gruesos) o } PWF_i = \frac{CF_i}{UWB} \text{ (Agregados finos)}$$

Donde:

PWC_i : Percent by weight of Coarse aggregate (Porcentaje con respecto al peso de cada fuente i de agregados)

PWF_i : Percent by weight of Fine aggregate (Porcentaje con respecto al peso de cada fuente i de agregados)

7.- Determinación del porcentaje de finos en cada fuente de áridos gruesos y porcentaje de gruesos de cada fuente de áridos finos, tomando en consideración el NMPS que predomina en las fuentes de áridos para obtener el PCS.

$FACAI_i$ = porcentaje de la fuente de áridos gruesos i que pasa por el tamiz correspondiente al PCS.

$CAFAI_i = 100\%$ - porcentaje de la fuente de áridos finos i que pasa por el tamiz correspondiente al PCS.

Donde:

$FACAI_i$: Fine aggregates of coarse aggregate stockpile.

$CAFAI_i$: Coarse aggregates of fine aggregate stockpile.

8.- Determinación de los áridos finos que se encuentran en cada fuente de áridos gruesos con respecto al total de la mezcla de agregados.

$$PFAB_i = PWC_i \cdot FACAi_i$$

Donde:

PFAB_i :Percent Fine Aggregate in Blend of coarse stockpile i.

9.- Sumatoria de los áridos finos presentes en todas las fuentes de áridos gruesos.

$$PFAB_T = \sum PFAB_i$$

Donde:

PFAB_T : Total Percent Fine Aggregate in Blend of coarse stockpile.

10.- Determinar el agregado grueso en cada fuente de agregado fino de acuerdo a su porcentaje en la mezcla.

$$PCAB_i = PWF_i \cdot CAFAi_i$$

Donde:

PCAB_i : Percent Coarse Aggregate in Blend of fine stockpile i.

11.- Sumatoria de los áridos gruesos presentes en todas las fuentes de áridos finos.

$$PCAB_T = \sum PCAB_i$$

Donde:

PCAB_T : Total Percent Coarse Aggregate in Blend of fine stockpile.

12.- Corrección del porcentaje inicial con respecto al peso de cada fuente de agregado grueso, teniendo en cuenta el porcentaje de agregado fino calculado de cada fuente de áridos gruesos y el porcentaje de agregado grueso encontrado en las fuentes de áridos finos.

$$ACA_i = PWC_i - PFAB_i + \frac{PWC_i \cdot PCAB_T}{\sum PWC_i}$$

Donde:

ACA_i :Adjusted Coarse Aggregate of stockpile i (ajuste de los áridos gruesos de la fuente i).

13.- Corrección del porcentaje inicial con respecto al peso de cada fuente de agregado fino, teniendo en cuenta el porcentaje de agregado grueso calculado de cada fuente de áridos finos y el porcentaje de agregado fino encontrado en las fuentes de áridos gruesos.

$$AFA_i = PWF_i - PCAB_i + \frac{PWF_i \cdot PFAB_T}{\sum PWF_i}$$

Donde:

AFA_i :Adjusted Fine Aggregate of stockpile i (ajuste de los áridos finos de la fuente i).

14.- Determinar la cantidad de material bajo el tamiz 0.075 [mm] que aporta cada fuente, teniendo en consideración el ajuste realizado a cada fuente de áridos.

$$PCC_i = ACA_i \cdot P_{i,0,075}$$

$$PCF_i = AFA_i \cdot P_{i,0,075}$$

Donde:

PCC_i : percent contribution of coarse aggregate (contribucion porcentual de la fuente de agregados gruesos i a la fracción que pasa el tamiz 0.075 [mm])

PCF_i : percent contribution of fine aggregate (contribucion porcentual de la fuente de agregados finos i a la fracción que pasa el tamiz 0.075 [mm])

$P_{i,0,075}$: Porcentaje de áridos de la fuente i que pasa por el tamiz 0.075 [mm].

15.- Determinar la cantidad en porcentaje de la fuente de mineral filler (MF) a utilizar en la mezcla , para cumplir con la cantidad deseada de áridos que pasan por el tamiz 0.075 [mm] ($P_{0,075}$).

$$PMF = \frac{P_{0,075} - \sum(PCC_i + PCF_i)}{MF_{0,075}}$$

Donde:

PMF: Porcentaje de la fuente de Mineral Filler.

$P_{0,075}$: Porcentaje deseado de áridos que pasan por el tamiz 0.075 de la mezcla de áridos.

$MF_{0,075}$: Porcentaje de áridos de la fuente de mineral Filler que pasa por el tamiz de 0.075 [mm].

16.- Determinar el porcentaje final de áridos finos, considerando la fracción de mineral filler extraída de estos. Para los áridos gruesos no se realiza esta consideración.

$$FBP_i = AFA_i - \sum\left(\frac{AFA_i \cdot PMF}{\sum AFA_i}\right)$$

Donde:

FBP_i : Final Fine Blend Percent (Porcentaje final de áridos finos de la fuente i en la mezcla).

De esta manera se obtienen los porcentajes de cada fuente de agregados que deben ser mezclados:

- ACA_i (porcentaje de la mezcla de cada fuente de áridos gruesos i)
- FBP_i (porcentaje de la mezcla de cada fuente de áridos finos i)
- PMF (porcentaje de la mezcla de la fuente de áridos mineral filler)

Estos valores deben cumplir que $\sum ACA_i + \sum FBP_i + PMF = 100\%$. Con estos porcentajes más las fuentes de agregados se obtiene la granulometría deseada.

Con esta granulometría se está en condiciones de obtener 3 relaciones importantes que ayudan a evaluar los vacíos de agregado mineral en la mezcla (VAM)

Relación entre los áridos gruesos (CA Ratio, Coarse Aggregate Ratio)

Esta relación es utilizada para evaluar el empaquetamiento de los áridos gruesos en la mezcla. Para esto se introduce el concepto de partículas interceptoras (son las partículas que se encuentran en el rango de : % Passing Half Sieve – % Passing PCS), las cuales son incapaces de llenar los vacíos generados por las partículas más grandes del agregado grueso (100% – % Passing Half Sieve). La relación se calcula con la ecuación que sigue:

$$\text{CA Ratio} = \frac{(\% \text{ Passing Half Sieve} - \% \text{ Passing PCS})}{(100\% - \% \text{ Passing Half Sieve})}$$

Un CA Ratio dentro de los rangos adecuados permite obtener una estructura de áridos más balanceada lo que podría dar como resultado una mezcla de mayor facilidad a la compactación en terreno y mejor desempeño a las cargas de tráfico.

Relación entre la fracción gruesa de los áridos finos (FAc, Fine Aggregate Coarse ratio)

La relación se determina como sigue:

$$\text{FAc} = \frac{\% \text{ Passing SCS}}{\% \text{ Passing PCS}}$$

La cual representa realmente la fracción más fina de los áridos finos, ya que si esta relación aumenta, también aumenta la fracción más fina de los áridos finos. Esta relación tiene una importante influencia sobre los vacíos en el agregado mineral (VAM), ya que los vacíos en el agregado fino aumentan cuando esta relación decrece.

Relación entre la fracción fina de los áridos finos (FA_f, Fine Aggregate Fine ratio)

Esta relación es similar a la anterior, pero esta vez se analiza la fracción más fina de áridos en la mezcla, y se representa así:

$$\text{FA}_f = \frac{\% \text{ Passing TCS}}{\% \text{ Passing SCS}}$$

La siguiente tabla muestra los rangos recomendados por el método Bailey para las tres relaciones expuestas anteriormente, de acuerdo a distintos NMPS.

Tabla 2.16: Rangos para los parámetros Bailey.

	NMPS [mm]					
	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75
CA Ratio	0.8 - 0.95	0.70 - 0.85	0.60 - 0.75	0.50 - 0.65	0.40 - 0.55	0.30 - 0.45
FAc	0.35 - 0.50	0.35 - 0.50	0.35 - 0.50	0.35 - 0.50	0.35 - 0.50	0.35 - 0.50
FA _f	0.35 - 0.50	0.35 - 0.50	0.35 - 0.50	0.35 - 0.50	0.35 - 0.50	0.35 - 0.50

Análisis de los parámetros del método Bailey

La densidad elegida (chosen unit weight) de cada fuente de áridos gruesos tiene efectos sobre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Existe una relación directamente proporcional entre la densidad elegida para cada fuente de áridos gruesos con los huecos de aire y vacíos de agregado mineral (VAM) en la mezcla. Los huecos de aire en la mezcla aumentan con la densidad elegida de los áridos gruesos debido al incremento de la fricción entre los áridos gruesos que componen el esqueleto de la mezcla, lo que incrementa la resistencia a la compactación de esta. En cuanto a los vacíos de agregado mineral, estos se encuentran mayormente en los áridos gruesos, por lo que un aumento de la densidad elegida de los áridos gruesos aumenta la cantidad de estos últimos en la mezcla (por definición de esta densidad). La cantidad exacta de variación de los vacíos depende también de la forma y textura de los áridos. De forma aproximada se puede decir que para una mezcla de áridos con esqueleto de áridos gruesos, un aumento de 5% en la densidad elegida, produce un incremento en los VAM de entre 0.5% a 1.0%. La variación de la densidad elegida de los áridos gruesos, no produce efectos en las propiedades antes mencionadas para las mezclas con graduación fina, ya que el esqueleto de mezcla está formado por áridos finos. Otro factor importante en el aumento de la densidad elegida de los áridos gruesos, tiene que ver con el incremento en la compactación de la mezcla, tanto en el laboratorio como en obra.

El incremento de la relación CA Ratio tiene como consecuencia un incremento en los huecos de aires y los VAM, debido a que las partículas interceptoras de la fracción gruesa incrementan la resistencia a la densificación de la mezcla. De forma aproximada se puede cuantificar que para una mezcla de graduación gruesa, un incremento de 0.2 del CA Ratio produce un incremento de entre 0.5% y 1.0% de los VAM. Otra variable importante que el CA Ratio controla, es la segregación de la mezcla, ya que para valores bajo los límites recomendados, pueden existir áreas de la carpeta asfáltica con exceso de áridos gruesos, además para valores sobre los límites la fracción de áridos gruesos se vuelve desbalanceada, lo que tiene como consecuencia que la carpeta asfáltica se dilate durante la compactación.

En cuanto a F_{Ac} y F_{Af} Ratios, la disminución de estos produce un incremento de los huecos de aire y de los VAM, debido a que el empaquetamiento de la fracción de finos en la mezcla de áridos se vuelve más densa. Una disminución de 0.05% en F_{Ac} o F_{Af} Ratio produce un incremento de los VAM que está en el rango de 0.5% a 1.0%.

En el diseño de la mezcla cada parámetro tenderá a actuar independientemente en el cambio de los huecos de aire, los VAM, la trabajabilidad y desempeño de la mezcla asfáltica, todo esto centrándonos solamente en la graduación y dejando de lado otras variables de los áridos, como son textura, forma, dureza, etc.

2.1.4 Metodología RAMCODES

La metodología racional para el análisis de densificación y resistencia de geomateriales compactados RAMCODES (Rational Methodology for Compacted geomaterials' Densificación and Strength analysis), propone que el desempeño de una gradación para mezclas asfálticas en caliente puede ser mejorado utilizando una clasificación cuantitativa, la cual transforme la granulometría en un par de parámetros que se correlacionen con los parámetros de comportamiento de una mezcla asfáltica.

Principios de la metodología RAMCODES

La metodología RAMCODES utiliza 3 postulados para desarrollar su concepto de la carta de gradación:

1. Dentro de la categoría de geomateriales compactados se pueden incluir suelos granulares, árido-cemento y mezcla asfáltica. De este modo los conceptos y criterios desarrollados para cada material pueden ser aplicados al resto.
2. Un sistema de clasificación para geomateriales debe considerar al menos la granulometría y la superficie específica de áridos finos (representada indirectamente por el concepto de plasticidad del suelo), siendo estos los principales factores inherentes que influyen el comportamiento mecánico e hidráulico de un suelo.
3. Para una buena interpretación del comportamiento de un geomaterial compactado el sistema de clasificación basado en la recopilación de datos y diseño, debe ser cuantitativo, es decir, reproducir en una escala numérica continua la correlación de dichos datos con los parámetros de comportamiento del geomaterial.

Clasificación de los suelos según RAMCODES

La metodología RAMCODES busca una combinación de geomateriales bien graduados (en el caso de las mezclas asfálticas en caliente son áridos triturados) , para obtener una densificación en la mezcla que permita un buen comportamiento mecánico e hidráulico (permeabilidad de la mezcla), esto debido a que densidades altas y buena capacidad de soporte , se obtienen con materiales granulares bien graduados , mientras que granulometrías uniformes dan como resultado mayores permeabilidades y capacidad de soporte más baja.

El sistema de clasificación unificado para suelos, contenido en la normativa ASTM, utiliza un coeficiente de uniformidad C_u y un coeficiente de curvatura C_c , para clasificar la gradación de un material granular con menos de 12% de finos (partículas que pasan la malla N° 200 o abertura 0,075[mm]), lo cual entra en el rango para la mayoría de las gradaciones de áridos para mezclas asfálticas.

La relación entre los índices granulométricos de los áridos que definen el coeficiente de uniformidad es el siguiente:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

Donde:

D_{60} : Abertura del tamiz por el cual pasa el 60 % de las partículas.

D_{10} : Abertura del tamiz por el cual pasa el 10 % de las partículas.

El valor de este parametro aumenta con la no uniformidad de la mezcla de áridos. Una mezcla de áridos compuesta principalmente por grava y otra por arena son consideradas bien graduadas, cuando el coeficiente de uniformidad C_u es mayor que 4 y 6 respectivamente. El coeficiente de curvatura se define según:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad (2)$$

Donde:

D_{30} : Abertura del tamiz por el cual pasa el 30 % de las partículas.

Para una mezcla de áridos bien graduadas el coeficiente de curvatura debe estar en el rango de valores 1 a 3. Por otro lado, una mezcla de áridos bien graduada puede ser ajustada por el modelo alométrico de gradación, más conocido como representación o curva de Fuller, el cual es utilizado en la metodología SUPERAVE para construir su carta de gradación y que se modela con la siguiente ecuación:

$$p_i = \left(\frac{D_i}{D_{\max}} \right)^n \quad (3)$$

Donde:

p_i : Porcentaje que pasa por el tamiz de abertura D_i .

D_i : Abertura del tamiz i .

D_{\max} : Tamaño máximo de la mezcla de áridos.

n : factor de forma.

A diferencia de la carta de gradación utilizada en la metodología SUPERPAVE, en donde el factor de forma n se fija en 0,45, en RAMCODES el factor de forma de cierta granulometría se debe ajustar de acuerdo al coeficiente de determinación R^2 (ecuación 4) el cual representa la variación del porcentaje que pasa cada uno de los tamices de la serie para ser representado por el modelo.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum \left(P_i - \left[\frac{D_i}{D_{\max}} \right]^n \right)^2}{\sum P_i^2 - \frac{(\sum P_i)^2}{N}} \quad (4)$$

Donde:

P_i : Porcentaje que pasa por el tamiz de diámetro D_i .

N : Numero de tamices considerados en la gradación.

Para que una granulometría sea representada por el modelo (n, D_{\max}) , el valor de R^2 debe acercarse a 1. Basado en la experiencia de granulometrías analizadas por la metodología RAMCODES, para un valor de R^2 superior a 0,97 el modelo es representativo. Para el rango de gradaciones utilizadas en SUPERPAVE y para las bandas granulométricas recomendadas por el Laboratorio Nacional de Vialidad chileno, se observan que estas se ajustan al modelo debido a que el rango de valores para R^2 que entregan estas mezclas de áridos satisfacen la recomendación expuesta anteriormente. Sin embargo, para gradaciones del tipo SMA (Stone Matrix Asphalt) y mezclas de áridos abiertas no resulta valido la aplicación del modelo.

En lo que sigue, se buscara representar los coeficientes de uniformidad y curvatura en función de los parámetros n y D_{\max} . Para esto se utilizara la representación de Fuller (ecuación 3), suponiendo que el valor de n puede se ajustado por el modelo (R^2 superior a 0,97), siendo en consecuencia posible establecer una relación lineal entre la proporción de material que pasa P_i y su abertura de tamiz con respecto al tamaño máximo. De este modo podemos escribir las relaciones que siguen:

$$0,60 = \left(\frac{D_{60}}{D_{\max}}\right)^n \Rightarrow D_{60} = D_{\max} \cdot (0,60)^{1/n} \quad (5)$$

$$0,30 = \left(\frac{D_{30}}{D_{\max}}\right)^n \Rightarrow D_{30} = D_{\max} \cdot (0,30)^{1/n} \quad (6)$$

$$0,10 = \left(\frac{D_{10}}{D_{\max}}\right)^n \Rightarrow D_{10} = D_{\max} \cdot (0,10)^{1/n} \quad (7)$$

Sustituyendo las ecuaciones (5) y (7) en la ecuación (1), se obtiene:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{D_{\max} \cdot (0,60)^{1/n}}{D_{\max} \cdot (0,10)^{1/n}} = 6^{1/n} \quad (8)$$

Del mismo modo sustituyendo las ecuaciones (5) , (6) y (7) en la ecuación (2) , se obtiene:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \cdot D_{10}} = \frac{D_{\max}^2 \cdot (0,30)^{2/n}}{D_{\max} \cdot (0,60)^{1/n} \cdot D_{\max} \cdot (0,10)^{1/n}} = \left(\frac{0,09}{0,06}\right)^{1/n} = 1,5^{1/n} \quad (9)$$

Tomando en cuenta la condición que establece para gravas y arenas bien graduadas el coeficiente de uniformidad debe ser mayor o igual a 4 y 6 respectivamente, entonces de la ecuación (8) se puede inferir que para mezclas de áridos del tipo grava el coeficiente de forma debe ser menor a 1,29, mientras que para mezclas de áridos con predominio de la fracción de arena, n debe ser menor a 1,0. De esta manera se obtiene una cota superior para el valor de n que cumple con el criterio RAMCODES. Para determinar una cota inferior del valor de n , se recurre a la condición que el coeficiente de curvatura debe ser menor o igual a 3 (para buenas gradaciones de cualquier tipo de geomaterial compactado), lo que incorporando en la ecuación (9) permite determinar la cota inferior para n igual a 0,37.

De esta manera se estable un rango de valores para el coeficiente de forma (grafico 2.1), para el cual se asegura que las mezclas de áridos no resulten de graduación uniforme.

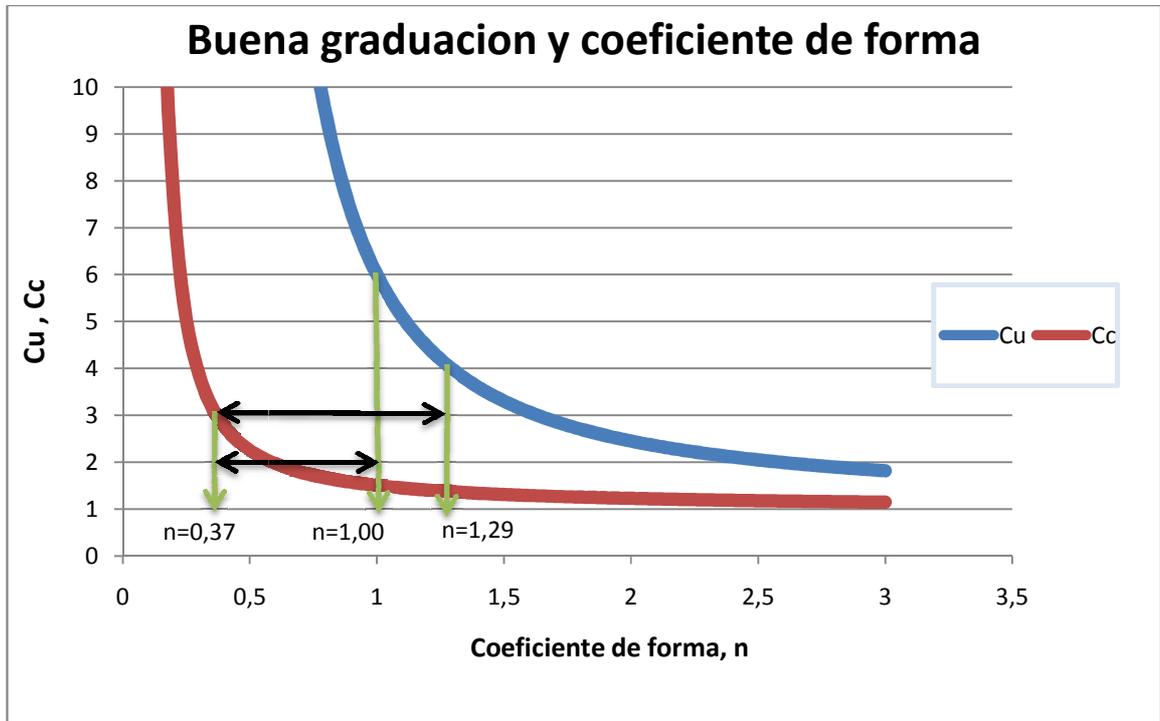


Gráfico 2.1: Recomendación RAMCODES de buena graduación.

Se puede notar que para la determinación de una buena graduación sólo interviene el coeficiente de forma (ecuaciones 8 y 9) y esto es lógico, ya que el parámetro n , representa a la forma de la distribución de tamaño de partículas de una mezcla de áridos.

Otro factor característico a las mezclas asfálticas en caliente, en que se basa la metodología RAMCODES es la razón grava/arena. Según el sistema de clasificación unificado de suelos incluido en la normativa ASTM, las partículas de gravas son las que se encuentran entre los tamices 75 [mm] a 4,75 [mm], las partículas de arena son las que se encuentran entre las aberturas de 4,75 [mm] a 0,075 [mm] y las partículas finas son las que pasan la malla 0,075 [mm]. De este modo y utilizando la nomenclatura anterior se define la fracción de grava dentro de una mezcla como:

$$G = 1 - p_{4,75} \quad (10)$$

Y el contenido de Arena como:

$$S = p_{4,75} - p_{0,075} \quad (11)$$

Donde:

: Porcentaje bajo el tamiz N°4.

: Porcentaje bajo el tamiz N°200.

Utilizando las ecuaciones (3), (10) y (11) la razón grava/arena se define como sigue:

$$\frac{G}{S} = \frac{1 - p_{4,75}}{p_{4,75} - p_{0,075}} = \frac{\left(\frac{D_{max}}{D_{max}}\right)^n - \left(\frac{4,75}{D_{max}}\right)^n}{\left(\frac{4,75}{D_{max}}\right)^n - \left(\frac{0,075}{D_{max}}\right)^n} = \frac{D_{max}^n - 4,75^n}{4,75^n - 0,075^n} \quad (12)$$

Carta de gradación RAMCODES

La metodología RAMCODES introduce la representación punto-ámbito, para representar la granulometría a través de los parámetros n y D_{\max} en un plano cartesiano, donde una gradación es representada por un punto de coordenadas (n, D_{\max}) . De este modo la representación tradicional de una banda granulométrica puede ser expresada en la representación punto-ámbito, como un rectángulo o ámbito. Para ello se utiliza la granulometría superior e inferior representadas por sus respectivos parámetros (n_1, D_1) y (n_2, D_2) . Los restantes vértices del rectángulo son (n_1, D_2) y (n_2, D_1) , para formar el ámbito en que las granulometrías cumplen con la banda. En el gráfico 2.2 se representa según la metodología punto-ámbito, una banda granulométrica a la cual se obtuvieron sus respectivos parámetros n y D_{\max} , para luego formar las otras dos curvas granulométricas utilizando la ecuación 3 y los parámetros (n_1, D_2) y (n_2, D_1) para cada gradación. Por otro lado en el gráfico 3 se aprecia el ámbito de parámetros (n, D_{\max}) para el cual una curva granulométrica formada a partir de la ecuación de Fuller cumple con la banda.

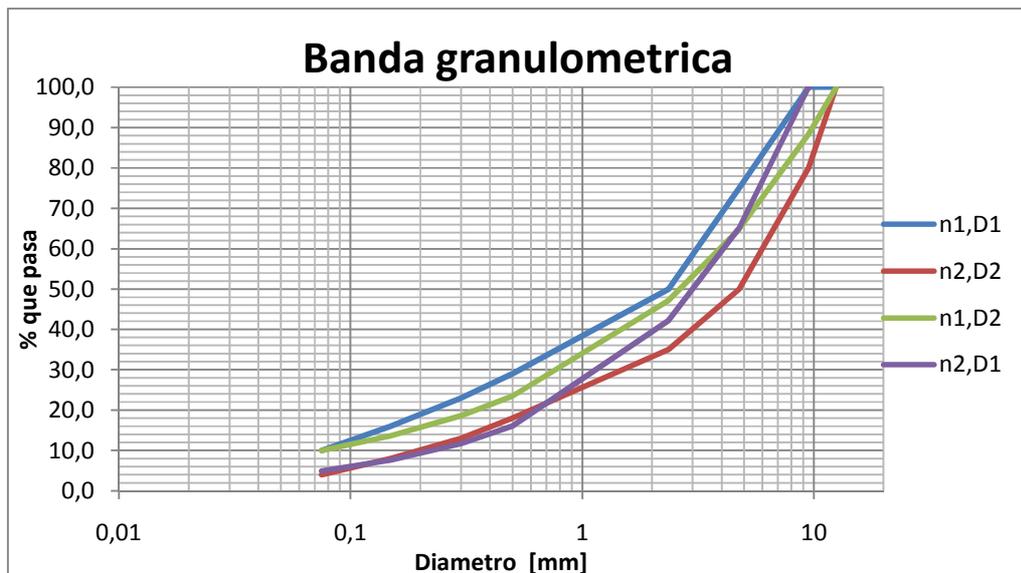


Gráfico 2.2: Banda granulométrica (n, D_{\max}) .

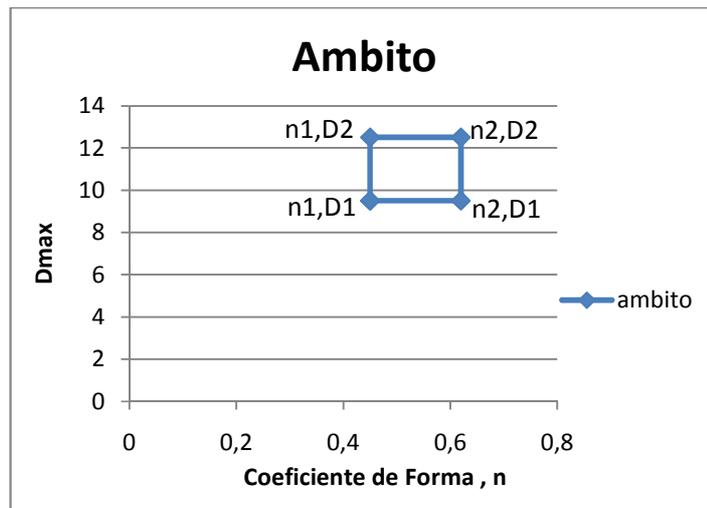


Gráfico 2.3: Representación punto-ambito.

La forma general de carta de gradación se puede ver en el gráfico 4, la cual incluye las recomendaciones de buenas graduaciones tanto para mezclas con predominio de gravas y arenas. Además se incluyen las curvas para las cuales la relación grava-arena es la misma (ecuación 12) lo que permite saber tanto para una gradación (representada por un punto), como para una banda granulométrica (representada por un ámbito), su respectivo rango de valores para los parámetros G/S , n y D_{max} . Sin embargo, hasta ahora la carta de gradación, sólo muestra la relación entre los parámetros G/S , n y D_{max} , por lo que el siguiente paso que siguió la metodología RAMCODES, fue buscar correlaciones por medio de la experimentación entre estos parámetros y el desempeño de mezclas asfálticas constituidas por graduaciones con un rango en los parámetros G/S , n y D_{max} .

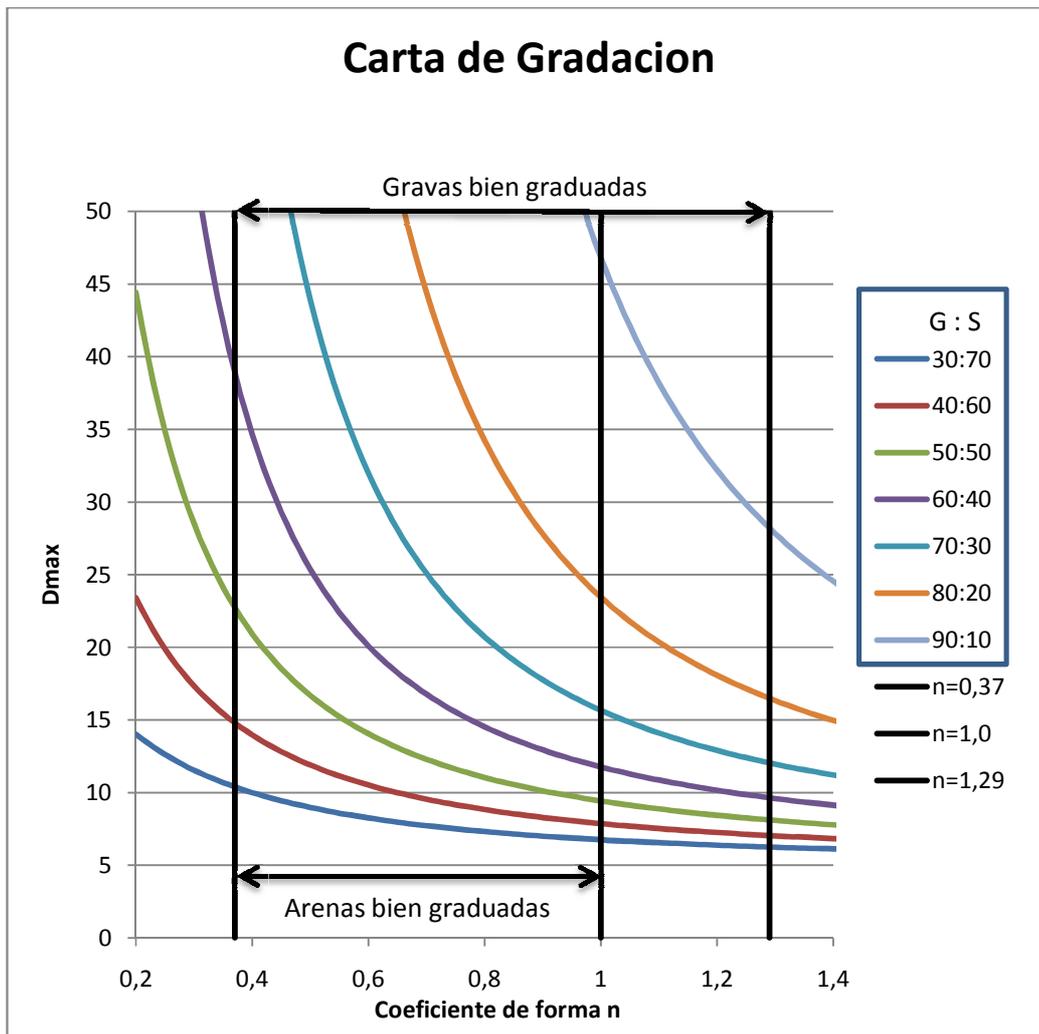


Grafico 2.4: Carta de gradación Ramcodes.

Carta de gradación y el desempeño de la mezcla asfáltica en caliente

Trabajabilidad

Esta propiedad describe la facilidad con la que una mezcla asfáltica puede ser colocada, manipulada y compactada. Esta propiedad depende de la temperatura de la mezcla, la naturaleza del bitumen y los áridos y de la gradación. El dispositivo utilizado para la medición fue una paleta sumergida en una muestra de la mezcla, la cual era girada por un motor eléctrico. Luego la medida de trabajabilidad se definió como el torque requerido para mantener la paleta rotando dentro de la mezcla a una velocidad constante. Para la confección de las mezclas asfálticas ensayadas, se mantuvo constante el tipo de bitumen a usar (70-22 PG Asphalt), la temperatura de la mezcla (120 [°C]) y la naturaleza de los agregados (grava chancada). En cuanto a las granulometrías utilizadas estas fueron elegidas a partir de los requerimientos SUPERPAVE y sus parámetros n , D_{max} y G/S obtenidos según lo descrito en párrafos anteriores. Los resultados obtenidos se resumen en la figura 2.3 y de estos se

desprende que sólo la razón G/S tiene cierta correlación con la trabajabilidad de la mezcla asfáltica, en donde un aumento en el contenido de grava produce una disminución en la trabajabilidad.

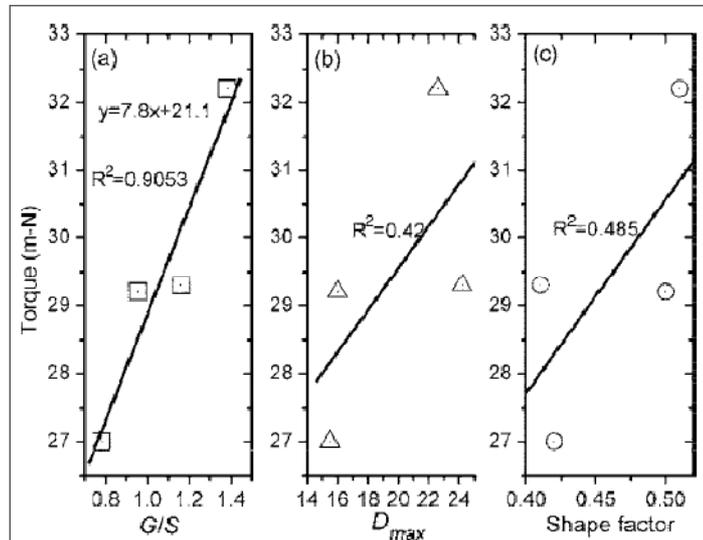


Figura 2.3: Trabajabilidad vs parámetros RAMCODES.

Ahuellamiento

La resistencia al ahuellamiento (deformación plástica bajo la huella del tránsito) es una de las más importantes respuestas de una mezcla asfáltica bajo cargas repetidas. El ensayo fue realizado por el dispositivo APA (asphalt pavement analyzer), utilizándose granulometrías de tamaño nominal máximo de 9,5 y 19 [mm] y la mezcla fue confeccionada utilizando el compactador giratorio SUPERPAVE con 75 y 100 giros, los cuales fueron ajustados a la medición de la deformación de ahuellamiento para poder comparar las mezclas. Los resultados obtenidos se resumen en la figura 2.4, y estos indican una relación directamente proporcional entre el contenido de grava y la resistencia al ahuellamiento de una mezcla asfáltica.

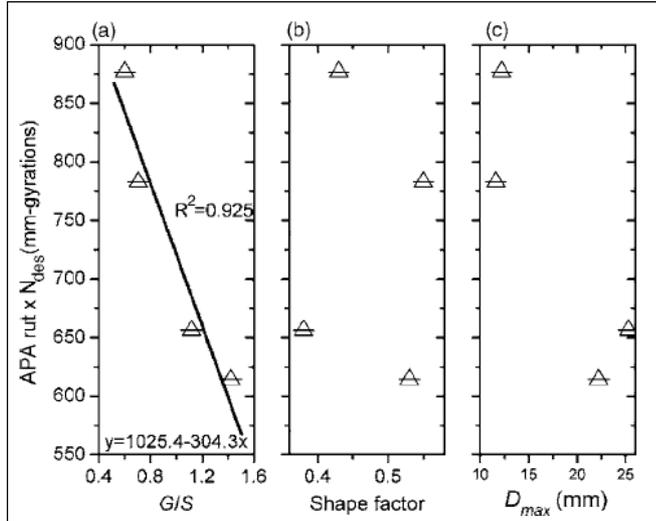


Figura 2.4: Ahuellamiento vs parámetros RAMCODES.

Permeabilidad

La permeabilidad de una mezcla asfáltica influye en el debilitamiento por fisuras producidas en ésta debido a la infiltración de agua y además es resultado de cambios indeseables en la capacidad de soporte de las capas granulares del camino. Esta propiedad depende fuertemente de la gradación de los agregados y el espesor. La medición se realizó utilizando mezclas desarrolladas para 11 proyectos de autopista en Estados Unidos las cuales incluyen los requerimientos SUPERPAVE de graduación de agregado. El coeficiente de permeabilidad fue medido para mezclas con vacíos de aire de 4, 6 y 8 %. Los resultados se observan en la figura 3 y se puede notar una clara relación entre la permeabilidad y los parámetros G/S y D_{max} , sobre todo para coeficientes de permeabilidad menores a 10^{-3} [cm/s] los cuales se obtienen para vacío de aire menor o iguales a 6%.

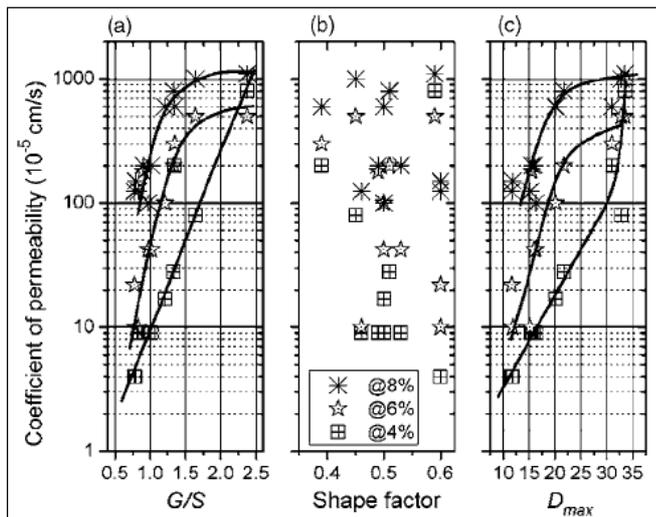


Figura 2.5: Permeabilidad vs parámetros RAMCODES.

Comentarios de la metodología

La carta de gradación permite realizar un diseño libre de la mezcla que se basa en las fuentes de áridos disponibles, teniendo en consideración el comportamiento de estas mezclas con respecto a la trabajabilidad, permeabilidad y resistencia al ahuellamiento. Además se puede tener presente el hecho de que tamaños máximos muy pequeños de la mezcla de agregados tienen un costo económico mayor debido a que se debe gastar más energía en triturar los áridos, por lo que al tener la posibilidad de diseñar la graduación sería posible ajustar el tamaño máximo de acuerdo al comportamiento deseado para cumplir con las cargas de tráfico que será solicitada la mezcla asfáltica.

Un análisis que esta fuera de los alcances de este trabajo y que la metodología RAMCODES no tiene contemplado, debería ser el buscar correlaciones entre el % de asfalto óptimo y los parámetros utilizados para formar la carta de gradación de la metodología RAMCODES (coeficiente de forma n y tamaño máximo D_{max}), ya que si se pudieran encontrar rangos de % de asfalto óptimo para ciertos ámbitos formados por el par (n, D_{max}) , se podría facilitar el diseño de las mezclas asfálticas al utilizar la metodología RAMCODES en la elección de la granulometría. Esta recomendación sólo sería complementaria a la metodología de RAMCODES del polígono de vacíos para la determinación precisa del contenido de asfalto.

Respecto de las ventajas que tiene carta de gradación propuesta por la metodología RAMCODES sobre la representación tradicional de la curva granulométrica están:

1. La gradación puede ser cuantificada
2. Las características de muchas granulometrías pueden ser comparadas en un mismo grafico
3. La influencia de los parámetros de una gradación (n , D_{max} y G/S) sobre el desempeño de una mezcla asfáltica pueden ser evaluados al mismo tiempo.

2.2 Metodologías para la dosificación

2.2.1 Procedimiento Marshall de dosificación

Antecedentes

El método es válido para mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con tamaño máximo de 25 [mm]. El tamaño de las probetas es de diámetro fijo de 101,6 [mm] y de altura 63,5 [mm] con un factor de corrección por altura para obtener la estabilidad de la probeta. Esta altura de probeta se logra con 1100 [g] de agregados, y un porcentaje asfalto que referido al peso de los áridos.

El cemento asfáltico deberá cumplir con las especificaciones descritas en 8.301.1 del M.C. si se trata de CA 24 o CA 14, con las especificaciones de la tabla 5.408.202.A si se trata de cementos asfálticos modificados con polímeros y los requisitos de la tabla 5.408.202.B si se trata de asfaltos del tipo multigrado.

Los áridos deberán cumplir con los requisitos del 5.408.201, tanto en propiedades como en granulometría.

Determinaciones Previas

Densidad real seca de la fracción gruesa y fina de cada fuente de agregados para luego obtener esta densidad para la mezcla de los áridos de acuerdo a:

$$\rho_{RS} = P_1 \cdot \rho_{RS1} + P_2 \cdot \rho_{RS2} + \dots + P_n \cdot \rho_{RSn} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Donde:

ρ_{RS} : Densidad real seca de la mezcla de áridos [kg/m³]

P_i : Fracción en peso de cada fuente de áridos (i=1,...,n)

ρ_{RSi} : Densidad real seca de cada fuente de agregados (i=1,...,n) [kg/m³]

Densidad del cemento asfáltico ρ_b , a 25 [°C], según el procedimiento descrito en el numeral 8.302.2 del M.C.

Para un contenido de asfalto previsto, determinar la densidad máxima de la muestra suelta o sin compactar D_{mm} [kg/m³], de acuerdo al método 8.302.37 del M.C. y la siguiente expresión:

$$D_{mm} = \frac{M_m}{M_m + MP_a - MP_{am}} \cdot \rho_T$$

Donde:

M_m : Masa de la muestra a temperatura ambiente [g]

MP_a : Masa del recipiente lleno con agua [g]

MP_{am} : Masa del recipiente lleno con agua y la muestra [g]

ρ_T : Densidad del agua a temperatura del ensayo [kg/m³]

Estimar un porcentaje de asfalto referido al agregado (P_b) que se crea cercano al óptimo y determinar otros cuatro porcentajes de asfalto de acuerdo a : $P_b+1.0\%$, $P_b+0.5\%$, $P_b-0.5\%$ y $P_b-1.0\%$.

Confeccionar 3 probetas para cada uno de los 5 porcentajes de asfalto distinto de acuerdo al procedimiento 8.302.40 del M.C. y determinar su densidad compactada G [kg/m^3], según el método 8.302.38 del M.C.

Medir la estabilidad y fluencia utilizando el equipo y procedimiento Marshall descrito en el numeral 8.302.40 del M.C.

Calculo de vacíos en el agregado mineral y huecos de aire

Calcular la densidad efectiva del agregado ρ_E , utilizando el contenido de asfalto P_b para el cual se determino la densidad máxima de la mezcla suelta D_{mm} , según la expresión:

$$\rho_E = \frac{100}{\frac{100+P_b}{D_{mm}} - \frac{P_b}{\rho_b}} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Calcular la densidad máxima de la mezcla suelta D_{mm} para distintos contenidos de asfalto, a partir de la determinación previa de ρ_E para un contenido de asfalto fijo.

$$D_{mm} = \frac{100+P_b}{\frac{100}{\rho_E} + \frac{P_b}{\rho_b}}$$

Calcular los vacíos en el agregado mineral de cada probeta de acuerdo a su porcentaje de asfalto y según la siguiente expresión:

$$VAM = 100 \cdot \left(1 - \frac{G}{\rho_{RS}} \cdot \frac{100}{100+P_b} \right) \text{ [%]}$$

Calcular el porcentaje de huecos de aire en la mezcla de cada probeta de acuerdo a su contenido de asfalto y según la formula:

$$V_a = 100 \cdot \frac{D_{mm}-G}{D_{mm}} \text{ [%]}$$

Finalmente se gráficán los parámetros de estabilidad, densidad, huecos de aire, vacíos en el agregado mineral y fluencia en función del contenido de asfalto, obteniendo la tendencia de cada curva. El contenido de asfalto óptimo se determina de acuerdo a :

$$P_b \text{ óptimo} = \frac{P_{b1}+P_{b2}+P_{b3}}{3}$$

Donde:

P_{b1} :Contenido de asfalto para la máxima estabilidad.

P_{b2} :Contenido de asfalto para la máxima densidad.

P_{b3} :Contenido de asfalto para un 5% de huecos de aire.

Se debe verificar que el valor de fluencia se encuentre en el rango de 8 -16 [0,25 mm]. Además se debe verificar un porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral (VAM) de acuerdo al tamaño máximo nominal (TMN) de la mezcla de áridos, de acuerdo a la tabla siguiente:

Tabla 2.17: Requerimientos tradicionales para los VAM.

TMN [mm]	% VAM mínimo
1,25	23,5
2,5	21
5	18
10	16
12,5	15
20	14
25	13

2.2.2 Procedimiento SUPERPAVE de dosificación

Selección de la granulometría

Se escogen 3 mezclas de áridos que deben cumplir con los requerimientos de los puntos de control, la zona de restricción y la línea de máxima densidad. Luego se establece el contenido de asfalto óptimo para cada mezcla y se confecciona esta. Finalmente se evalúan las 3 probetas correspondientes a cada mezcla, y se selecciona la granulometría para la mezcla que tuvo un mejor desempeño.

Parámetros volumétricos

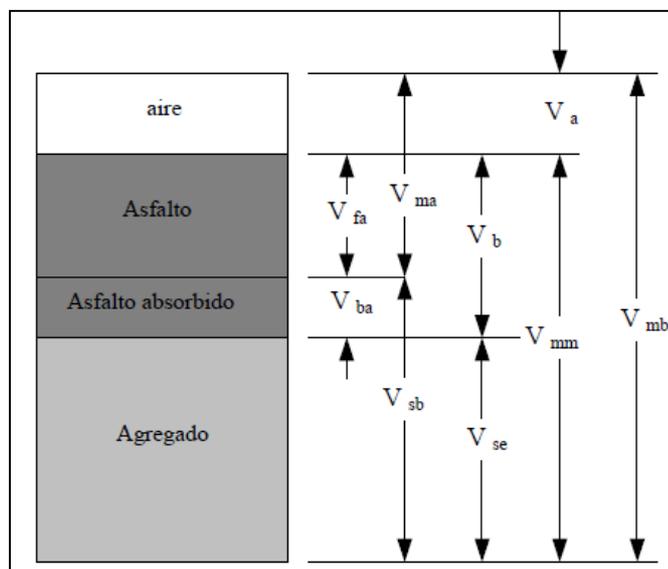


Figura 2.6: Parámetros volumétricos de una mezcla asfáltica.

Donde:

- V_{ma} = Volumen de vacíos en agregado mineral
- V_{mm} = Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos
- V_{fa} = Volumen de vacíos llenados con asfalto
- V_a = Volumen de vacíos de aire
- V_b = Volumen de asfalto
- V_{ba} = Volumen de asfalto absorbido
- V_{sb} = Volumen de agregado mineral (G_{sb})
- V_{se} = Volumen de agregado mineral (G_{se})

Determinación del porcentaje de asfalto inicial

$$G_{se} = G_{sb} + 0,8 \cdot (G_{sa} - G_{sb})$$

Donde:

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado

G_{sa} = Gravedad específica aparente del agregado (ASTM C127 y C128)

G_{sb} = Gravedad específica neta del agregado (ASTM C127 Y C128)

$$V_{ba} = \frac{P_s - (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}\right)} \cdot \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}}\right)$$

V_{ba} = Volumen de asfalto absorbido, cm^3/cm^3 de mezcla

P_s = Porcentaje de agregado con respecto a la mezcla total (suponer 0,95)

P_b = Porcentaje de asfalto con respecto a la mezcla total (suponer 0,05)

G_b = Gravedad específica del asfalto

V_a = volumen de vacíos de aire (suponer 0,04 cm^3/cm^3 de mezcla)

$$V_{be} = 0,176 - 0,0675 \cdot \log(S_n)$$

V_{be} = Volumen de asfalto efectivo

S_n = tamaño máximo nominal de la mezcla de agregados (mm)

$$W_s = \frac{P_s \cdot (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}\right)}$$

P_{bi} = Porcentaje de asfalto inicial, con respecto a la mezcla total.

W_s = Masa del agregado, gramos

$$P_{bi} = \frac{G_{sb} \cdot (V_{be} + V_{ba})}{(G_b \cdot (V_{be} + V_{ba}) + W_s)} \cdot 100$$

Esfuerzo de compactación

La metodología SUPERPAVE intentando acercarse a las condiciones reales de compactación de una mezcla asfáltica, utiliza el compactador giratorio ,para lo cual la mezcla se vacía en un molde cilíndrico de diámetro 150 [mm] y altura 115 [mm] que mediante la aplicación de una presión axial de 600 [kPa] (simulando el peso del rodillo) y el giro del cilindro en su eje de simetría a una velocidad de rotación de 30 [rev./min] y una inclinación en la base de 1,25° (simulando el cizalle producido por el giro de las ruedas del rodillo sobre todo el espesor de la capa asfáltica). La figura 2.6 muestra el equipo de compactación.

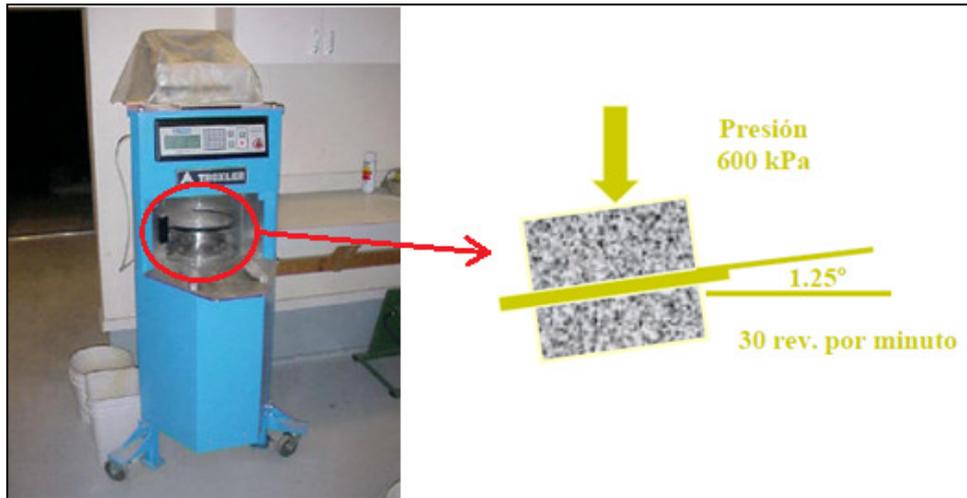


Figura 2.7: Compactador giratorio.

El numero de giros del molde cilíndrico se determina de acuerdo al tránsito esperado para un periodo de 20 años (*ESAL*, equivalent simple axel load). Existen tres niveles de compactación para un mismo nivel de tráfico que se asimila al su número de giros *N* por:

Ninicial: numero de giros que produce la mínima compactación necesaria en obra.

Ndiseño: numero de giros que produce la compactación de diseño en obra.

Nmaximo: numero de giros que produce la máxima compactación posible en obra.

La tabla 2.18 muestra los números de giro y requerimientos de la densidad de la probeta para cada nivel de tráfico a través de los *ESAL*, que establece el método SUPERPAVE.

Tabla 2.18: Requerimientos SUPERPAVE de compactación (numero de giros).

ESAL de diseño (millones)	Parámetros de compactación			Densidad requerida (% de Gmm)		
	N _{inicial}	N _{diseño}	N _{maximo}	N _{inicial}	N _{diseño}	N _{maximo}
< 0,3	6	50	75	≤ 91,5	≤ 96,0	≤ 98,0
0,3 a 3	7	75	115	≤ 90,5		
3 a 30	8	100	160	≤ 89,0		
> 30	9	125	205	≤ 89,0		

Procedimiento

Se debe elaborar 12 probetas considerando 4 porcentajes de asfalto a partir de un contenido de asfalto inicial P_{bi} ($P_{bi} + 0,5\%$, $P_{bi} - 0,5\%$, $P_{bi} + 1,0\%$ y P_{bi}) con 3 replicas para cada porcentaje de asfalto, siendo estas compactadas para el numero de giros de diseño ($N_{diseño}$) y según las condiciones de compactación establecidas anteriormente.

Las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla se obtendrán de acuerdo al nomograma de Heukelom para el ligante asfáltico y según el procedimiento 8.302.18 del Volumen 8 del Manual de Carreteras.

Para conocer las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, se deberán realizar dos ensayos:

1.- Gravedad específica teórica máxima, realizada a la mezcla asfáltica sin compactar de acuerdo a la norma ASTM D2041 o al volumen 8 del Manual de Carreteras, numeral 8.302.37 :

$$G_{mm} = \frac{M_m}{M_m + MP_a - MP_{am}}$$

Donde :

G_{mm} : Gravedad específica teórica máxima

M_m : Masa de la muestra a temperatura ambiente

MP_a : Masa del recipiente lleno con agua

MP_{am} : Masa del recipiente con la muestra y llenado con agua.

2.- Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada, de acuerdo a la norma ASTM D1188 o al volumen 8 del Manual de Carreteras, método B del numeral 8.302.38 :

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w}$$

Donde :

G_{mb} : Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.

W_a : Masa de la probeta en el aire.

W_w : Masa de la probeta en el agua.

W_{ss} : Masa de la probeta saturada y superficialmente seca.

A continuación y utilizando los resultados de G_{mm} y G_{mb} , se deben obtener los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica; vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos de asfalto (VFA) y vacíos de aire V_a , para cada una de las probetas confeccionadas con los respectivos contenidos de asfaltos determinados anteriormente, debiendo estos cumplir con las especificaciones.

$$V_a = 100 \cdot \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \%$$

Los vacíos de aire deberán estar en un rango de 3 a 5%.

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \cdot P_s}{G_{sb}} \%$$

Los requerimientos de VMA dependen del tamaño máximo nominal de la mezcla de agregados y se presentan en la tabla 2.19:

Tabla 2.19: Requerimientos SUPERPAVE de los VAM.

Tamaño máximo nominal del agregado [mm]	Mínimo % de VMA
9,5	15
12,5	14
19	13
25	12
37,5	11

$$VFA = 100 \cdot \frac{VMA - V_a}{VMA} \%$$

Los requerimientos para los VFA dependen de la carga de tránsito y se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.20: Requerimientos SUPERPAVE de los VAF.

ESAL de diseño (millones)	Mínimo % de VFA
< 0,3	70 - 80
0,3 a 3	65 - 75
3 a 30	
> 30	

Los 3 parámetros volumétricos son graficados con respecto a los 4 contenidos de asfalto. Luego se determina el contenido de asfalto para el cual los vacíos de aire son 4% (valor medio del rango exigido) y si cumple con los requisitos para los VMA y VFA, entonces se escoge como % de asfalto óptimo, si no se busca un % que cumpla con los requisitos para los 3 parámetros volumétricos.

También se debe comprobar la proporción de árido fino (que pasa el tamiz 0,075 [mm]) con el contenido de asfalto efectivo (asfalto total menos asfalto absorbido por los poros). Esta relación debe estar en el rango de 0,6 a 1,2.

Finalmente se debe realizar la prueba de susceptibilidad a la humedad por medio del ensayo de tensión indirecta (TSR) según la normativa AASHTO T283, la cual busca determinar la pérdida de resistencia que sufre la mezcla asfáltica después de ser acondicionada bajo agua a una temperatura constante de 60 °C durante 24 horas.

$$TSR = \frac{2000 \cdot P}{t \cdot D \cdot \pi}$$

Donde:

TSR: Tensión indirecta

P: Carga máxima [N]

t: espesor de la probeta [mm]

D: diámetro de la probeta [mm]

Para obtener la susceptibilidad a la humedad se deben ensayar a tensión indirecta la misma cantidad de probetas (acondicionadas bajo agua y sin acondicionar), para luego obtener el promedio de TSR de ambos grupos, debiendo cumplir con la siguiente restricción:

$$TSR \% = \frac{TSR \text{ (promedio de las probetas acondicionadas)}}{TSR \text{ (promedio de las probetas no acondicionadas)}} \cdot 100 \geq 80\%$$

2.2.3 El polígono de vacíos RAMCODES

La metodología RAMCODES ofrece una herramienta gráfica para la dosificación de mezclas asfálticas en caliente, a partir de las especificaciones correspondientes al primer nivel de dosificación del método SUPERPAVE.

El polígono de vacíos se construye considerando el primer postulado de la metodología RAMCODES, el cual incluye en la categoría de geomaterial compactado a las mezclas asfálticas en caliente, y la teoría de Coulomb la cual asocia la resistencia y deformación de un suelo a sus propiedades de cohesión y fricción, las cuales se asocian al contenido de asfalto (CA) y a la densidad neta compactada de la mezcla asfáltica (G_{mb} , trabazón entre las partículas de árido), para el caso de una mezcla asfáltica en caliente.

$$\tau = \sigma \cdot \tan(\phi) + c \xleftrightarrow{\text{Mezcla asfáltica}} \tau = \sigma \cdot \tan(G_{mb}) + CA$$

Esta forma gráfica de dosificación, tiene la ventaja práctica de medir y controlar la compactación de las capas asfálticas en obra a través de las dos variables antes mencionadas.

El polígono se construye en un plano cartesiano en el cual el eje de las abscisas representa el contenido de asfalto %CA, y el eje de las ordenadas la densidad de la mezcla compactada G. Los lados del polígono se forman a partir de las rectas que son función de los parámetros de vacíos (Porcentaje de vacíos de aire V_a , Vacíos en el agregado mineral VAM y Vacíos de aire llenos con asfalto VAF), imponiendo para cada uno de los tres parámetros sus requerimientos máximo y mínimo. En consecuencia el área encerrada por el polígono produce un espacio (%CA, G) para el cual se cumplen las especificaciones correspondientes al primer nivel de diseño SUPERPAVE.

Las ecuaciones que corresponden a los parámetros de vacíos son las que siguen:

$$V_a = 100 \cdot \frac{D_{mm} - G}{D_{mm}} \quad (1)$$

$$VAM = 100 - \frac{G(100 - \%CA)}{\rho_{RS}} \quad (2)$$

$$VFA = 100 \cdot \frac{VAM - V_a}{VAM} \quad (3)$$

Donde:

D_{mm} : Densidad máxima de la muestra sin compactar [kg/m^3]

ρ_{RS} : Densidad real seca de la mezcla de áridos [kg/m^3]

Despejando la densidad de la mezcla compactada, de las ecuaciones (1) y (2), se obtiene lo que sigue :

$$G = \left(1 - \frac{V_a}{100}\right) * D_{mm} \quad (4)$$

$$G = \frac{100 - VAM}{100 - \%CA} * \rho_{RS} \quad (5)$$

Incluyendo las ecuaciones (1) y (2) en la ecuación (3) y despejando G, se obtiene :

$$G = \frac{VFA}{\frac{1}{D_{mm}} + \frac{VFA * (100 - \%CA) - 100 - \%CA}{100 \rho_{RS}} - \frac{100 - \%CA}{\rho_{RS}}} \quad (6)$$

Con las ecuaciones (4),(5) y (6) se construye cada par de rectas. Luego de acuerdo al diseño del camino, se imponen las especificaciones del diseño volumétrico. A modo de ejemplo, se considerara que la granulometría tiene un tamaño máximo nominal del agregado de 19 [mm] , por lo que el rango permitido para los vacíos en el agregado mineral es el siguiente: $16\% > VAM > 13\%$.

El limite superior de este rango es informal y se estimo de acuerdo a una serie de investigaciones que concluyeron que VAM mayores al 16% producen demasiados vacíos intergranulares. Se considerara que el diseño tiene un numero de ejes equivalentes superior a los 300.000, por lo que el rango para los vacíos de aire llenos de asfalto es : $75\% > VAF > 65\%$

Los vacíos de aire para todas las mezclas están en el siguiente rango: $5\% > V_a > 3\%$.

Para determinar el valor de la densidad máxima de la mezcla no compactada, en función del contenido de asfalto, se utiliza la siguiente expresión:

$$D_{mm} = \frac{100}{\frac{100 - \%CA}{\rho_E} + \frac{\%CA}{\rho_b}} \quad (7)$$

Donde:

ρ_E : Densidad efectiva del agregado [kg/m^3]

ρ_b : Densidad del asfalto [kg/m^3] (1030 [kg/m^3], aproximadamente)

De este modo , incorporando la ecuación (7), en la ecuación (4) y (6), respectivamente, y teniendo los valores de ρ_E y ρ_{RS} que corresponden a parámetros de la mezcla de agregados, se puede obtener la densidad de la mezcla compactada G, en función del contenido de asfalto $\%CA$, y de los parámetros volumétricos V_a , VAM y VAF respectivamente.

A continuación se desarrollara un ejemplo de polígono de vacíos, para una mezcla asfáltica, que tiene las siguientes propiedades de sus agregados:

$\rho_E = 2728$ [kg/m^3].

$\rho_{RS} = 2690$ [kg/m^3].

Utilizando la ecuación (7) y las propiedades de los agregados, se calcularon las densidades máximas de la muestra sin compactar para los porcentajes de asfaltos que se ocuparan para construir el polígono de vacíos.

Tabla 2.21: Contenido de asfalto y Densidad máxima compactada.

%CA	D _{mm} [kg/m ³]
4,1	2555
4,6	2536
5,1	2516
5,6	2497
6,1	2479

Utilizando los valores de la tabla 1, las ecuaciones (4), (5) y (6), y las restricciones para los parámetros de vacíos, se calculan los pares (G,%CA), que forman las rectas que corresponden a los lados del polígono de vacíos. En la tabla 2 , se resumen estos valores.

Tabla 2.22: Contenido de asfalto y parámetros de vacíos.

%CA	G [kg/m ³]					
	Va %		VAM %		VAF %	
	3	5	13	16	65	75
4,1	2479	2428	2441	2357	2438	2482
4,6	2460	2409	2454	2369	2405	2453
5,1	2441	2391	2466	2381	2373	2426
5,6	2423	2373	2480	2394	2341	2399
6,1	2404	2355	2493	2407	2311	2372

El grafico 1 , muestra el polígono de vacíos correspondiente a los valores de la tabla 1.

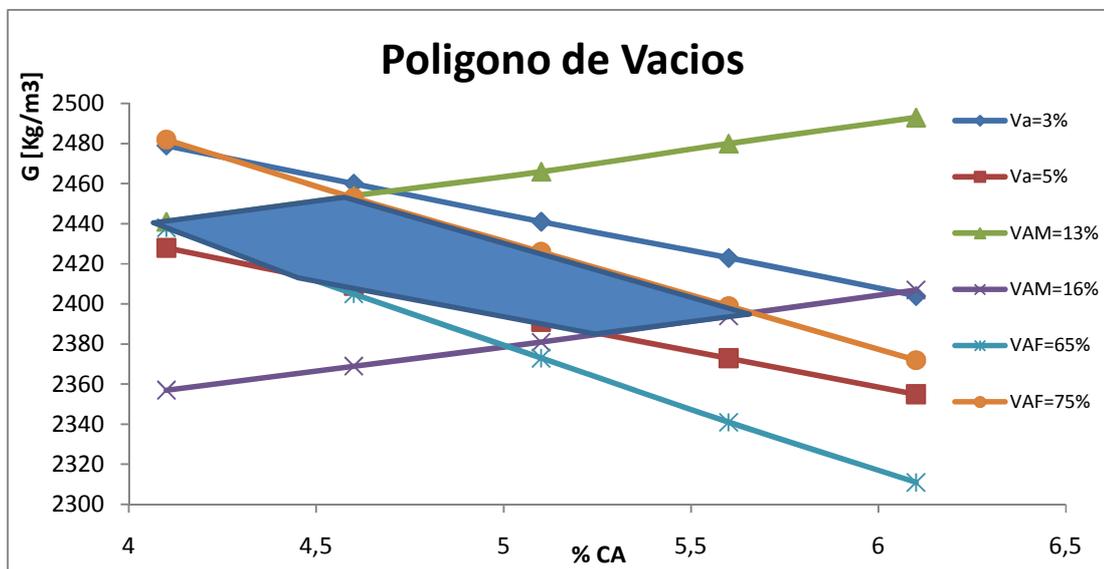


Grafico 2.5: Polígono de vacíos.

Del polígono de vacíos, se puede notar que la restricción del 3% de vacíos de aire, es menos rigurosa que la de 75% de vacíos llenos con asfalto, por lo que esta última es la que forma parte de un lado del polígono.

2.3 Análisis comparativo de bandas

En esta sección se analizarán de forma gráfica las bandas granulométricas con tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ ", debido a que son las más comúnmente utilizadas en mezclas asfálticas para capa de rodadura, la cual es la que presenta los requerimientos más exigentes.

Normativa mexicana SCT para granulometría de mezclas asfálticas

La normativa mexicana de la SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transporte) para bandas granulométricas tiene la particularidad de diferenciar las bandas recomendadas por cantidad de ejes equivalentes que solicitara la capa asfáltica. Las bandas granulométricas para un número de ejes equivalentes de 8,2 toneladas menor a 1 millón se muestran en la tabla 2.23.

Tabla 2.23: Normativa mexicana de bandas granulométricas, tránsito liviano.

Tamices		Tamaño nominal del agregado [mm]					
		12,5		19		25	
[mm]	ASTM	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
25	1"					100	100
19	3/4"			100	100	90	100
12,5	1/2"	100	100	90	100	76	89
9,5	3/8"	90	100	79	92	67	82
6,3	1/4"	76	89	66	81	56	71
4,75	Nº. 4	68	82	59	79	50	64
2	Nº 10	48	64	41	55	36	46
0,85	Nº 20	33	49	28	42	25	35
0,425	Nº 40	23	37	20	32	18	27
0,25	Nº 60	17	29	15	25	13	21
0,15	Nº 100	12	21	11	18	9	16
0,075	Nº 200	7	10	6	9	5	8

La serie de tamices utilizados en la norma SCT, difiere en algunos tamices con la norma ASTM. Los tamaños máximos mostrados corresponden a los más utilizados en mezclas asfálticas.

La tabla 2.24 muestra las bandas granulométricas para tránsito pesado, correspondiente a un número de ejes equivalentes acumulados mayor a 1 millón.

Tabla 2.24: Normativa mexicana de bandas granulométricas, transito pesado.

Tamices		Tamaño nominal del agregado [mm]					
		12,5		19		25	
[mm]	ASTM	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
25	1"					100	100
19	3/4"			100	100	90	100
12,5	1/2"	100	100	90	100	72	90
9,5	3/8"	90	100	76	90	60	76
6,3	1/4"	70	81	56	69	44	57
4,75	Nº. 4	56	69	45	59	37	48
2	Nº 10	28	42	25	35	20	29
0,85	Nº 20	18	27	15	22	12	19
0,425	Nº 40	13	20	11	16	8	14
0,25	Nº 60	10	15	8	13	6	11
0,15	Nº 100	6	12	5	10	4	8
0,075	Nº 200	2	7	2	6	2	5

A continuación se presenta una comparación gráfica de las bandas mexicanas para tamaño máximo de 19 [mm], y sus símiles de las bandas tradicionales más usadas para transito pesado (banda IV-a-12) y transito liviano (banda V-12), además de los requisitos SUPERPAVE.

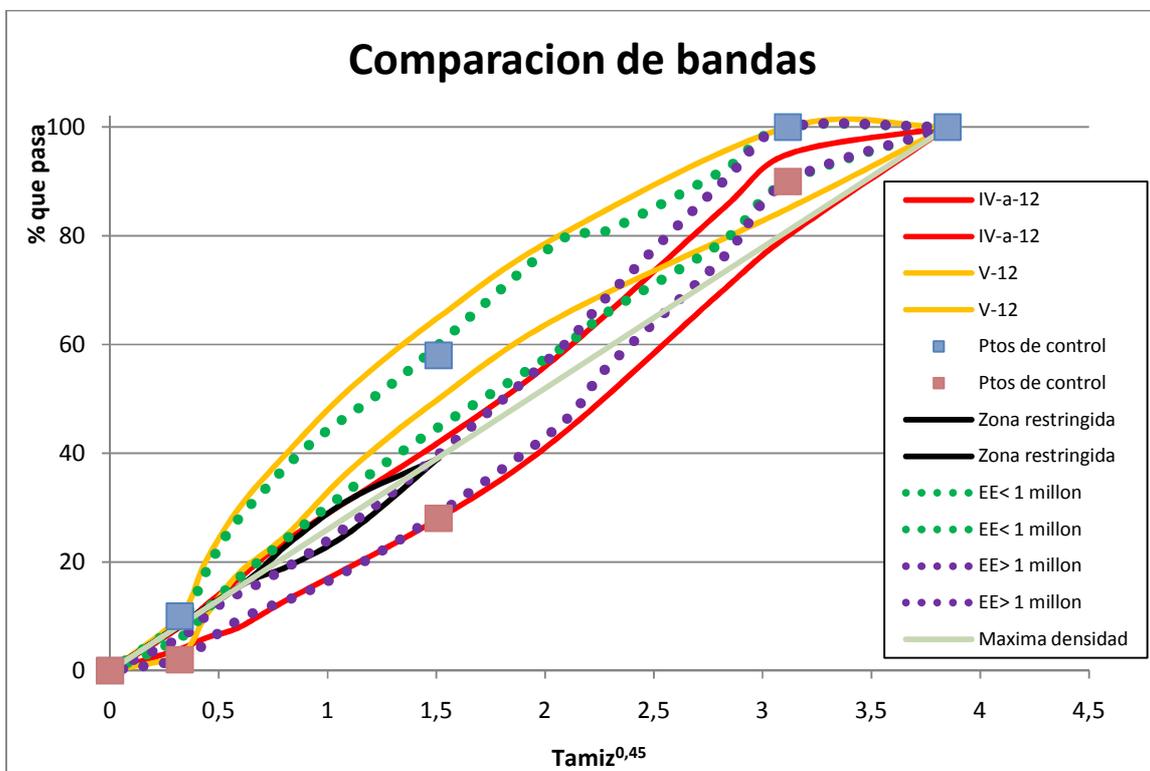


Gráfico 2.6: Comparación de bandas de transito pesado vs liviano.

Las bandas mexicanas cumplen con los requisitos de SUPERPAVE completamente, evitando la zona de restricción, la línea de máxima densidad y los puntos de control. Son parecidas a las bandas tradicionales salvo en el cumplimiento de SUPERPAVE lo que las hace más estrechas. Tanto para las bandas tradicionales y mexicanas se da la tendencia que las mezclas asfálticas para construir carpetas solicitadas para tránsito pesado, tienen menor cantidad de áridos que pasan los tamices más finos, mientras que las mezclas usadas para tránsito liviano tienden a ser granulometrías más finas.

Para complementar el análisis de estas bandas, se buscaron granulometrías que estuvieran fuera de los rangos permitidos de la metodología Bailey. La tabla 2.25 resume estas granulometrías, con el cálculo de sus parámetros Bailey.

Tabla 2.25: Bandas que no cumplen con los parámetros Bailey.

Tamices		No cumplen Bailey			
[mm]	ASTM	V-12	SCT tránsito liviano	SCT tránsito pesado	IV-a -12
19	3/4"	100	100	100	100
12,5	1/2"	92	92	92	92
9,5	3/8"	80	79	79	79
4,75	N° 4	65	59	58	58
2,36	N° 8	61	58	28	28
1,18	N° 16	39	39	25	25
0,6	N° 30	37	35	18	23
0,3	N° 50	19	19	13	13
0,15	N° 100	11	11	5	5
NMPS		12,5	12,5	12,5	12,5
Half Sieve		69,7	65,3	64,6	64,6
PCS		61	58	28	28
SCS		37	35	18	23
TCS		11	11	5	5
CA Ratio		0,29	0,21	1,04	1,04
FAc		0,61	0,60	0,64	0,82
FAf		0,30	0,31	0,28	0,22

Gráficamente estas granulometrías tienen una forma escalonada, utilizando todo el ancho permitido por cada banda granulométrica. De esto último se interpreta que la metodología Bailey sugiere distribuciones de tamaño sin grandes variaciones entre los tamaños de partículas correspondientes a los 4 tamices de control (Half sieve, PCS, SCS y TCS).

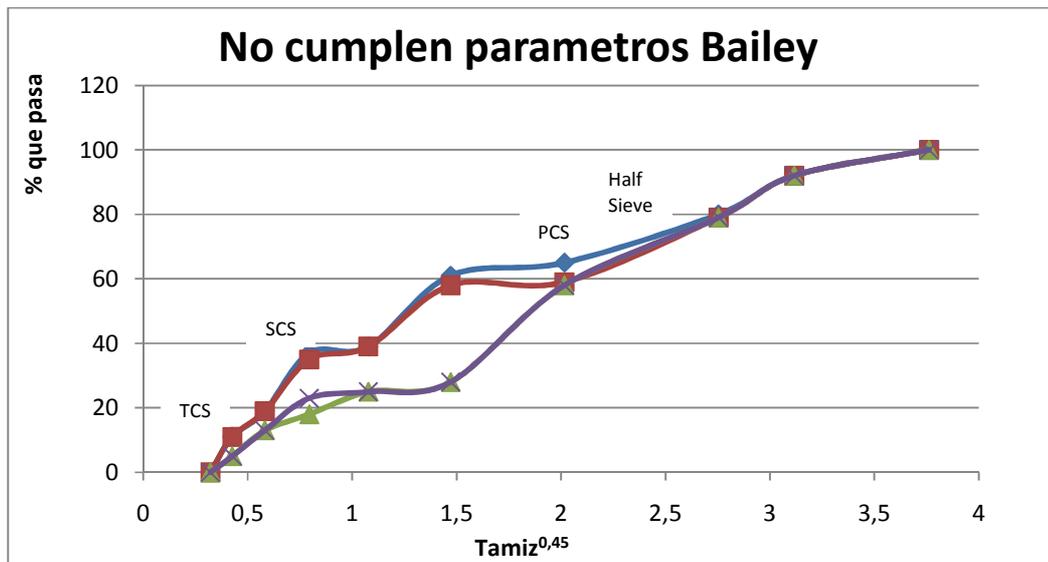


Grafico 2.7: Bandas que no cumplen con los parámetros Bailey.

En la práctica tradicional existen otras bandas con tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ " , las cuales son menos utilizadas que las anteriormente analizadas. Estas bandas se comparan con la especificación SUPERPAVE en el siguiente grafico.

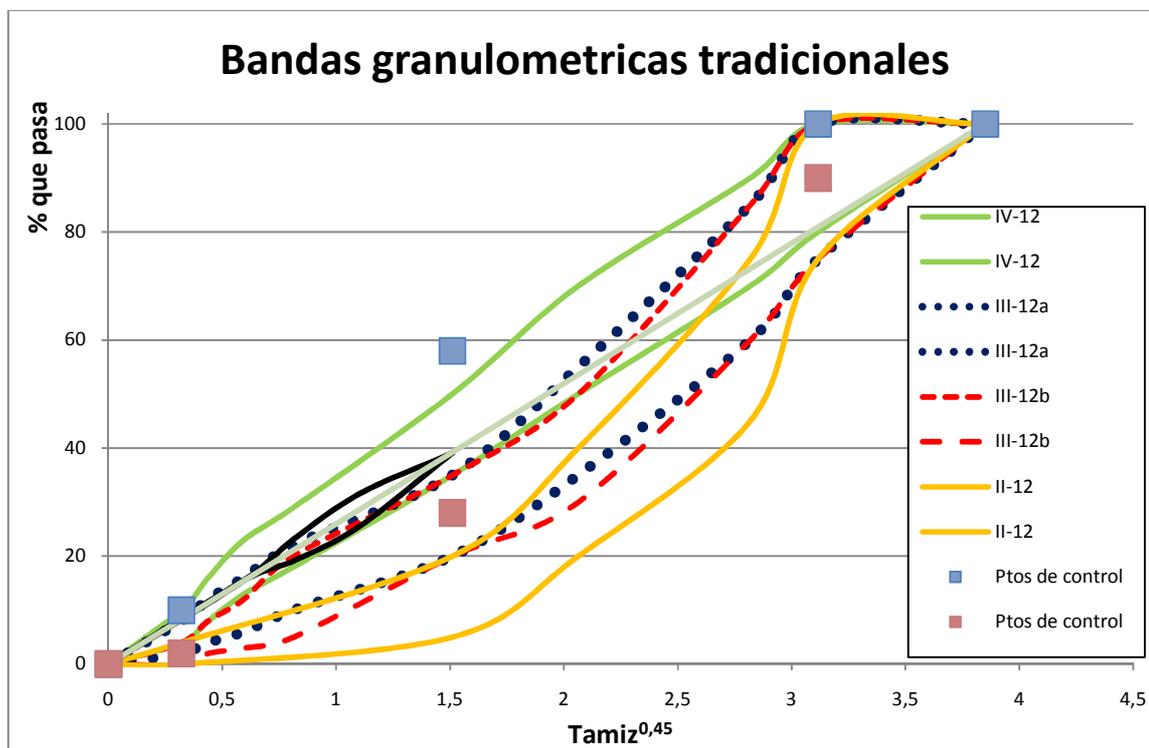


Grafico 2.8: Bandas granulométricas tradicionales.

Se puede notar que ninguna de estas bandas cumple con la totalidad de los requisitos SUPERPAVE.

El último análisis de esta sección corresponde a la metodología RAMCODES. Como se presento en el marco teórico, la mejor forma de analizar las bandas granulométricas bajo las recomendaciones de la teoría RAMCODES (Rational Methodology for Compacted geomaterials' Densificación and Strength analysis), es incorporar en la carta de gradación cada una de las bandas granulométricas. La tabla 2.25 resume los parámetros coeficiente de forma n y tamaño máximo D_{max} , obtenidos de cada granulometría, además del coeficiente de determinación R^2 .

Tabla 2.26: Parámetros de la carta de gradación RAMCODES.

Banda granulométrica		R^2	n	D_{max}
IV-12 Densa	Superior	0,9993	0,41	12,5
	Inferior	0,9997	0,51	19
IV-a-12 Semidensa	Superior	0,9919	0,4	19
	Inferior	0,999	0,59	19
III-12a Gruesa	Superior	0,9964	0,56	12,5
	Inferior	0,9993	0,73	19
III-12b Gruesa	Superior	0,9973	0,62	12,5
	Inferior	0,998	0,79	19
II-12 Abierta	Superior	0,9989	0,96	12,5
	Inferior	0,9878	1,07	19
V-12 Fina	Superior	0,9895	0,32	12,5
	Inferior	0,9909	0,39	19
SUPERAVE Puntos de control	Superior	0,9942	0,37	12,5
	Inferior	0,9899	0,54	19
Norma SCT EE< 1 millón	Superior	0,9956	0,35	12,5
	Inferior	0,9969	0,41	19
Norma SCT EE> 1 millón	Superior	0,9996	0,55	12,5
	Inferior	0,9916	0,55	19

Se puede ver que coeficiente de determinación fue mayor a 0,97 para todos los casos, por lo que se puede decir que el modelo es representativo para todas las bandas granulométricas. Es importante decir que no fue posible encontrar un modelo representativo de punto-ámbito para la zona restrictiva de los requerimientos SUPERPAVE.

A continuación se presentan en la carta de gradación de RAMCODES las bandas granulométricas presentadas en la tabla anterior.

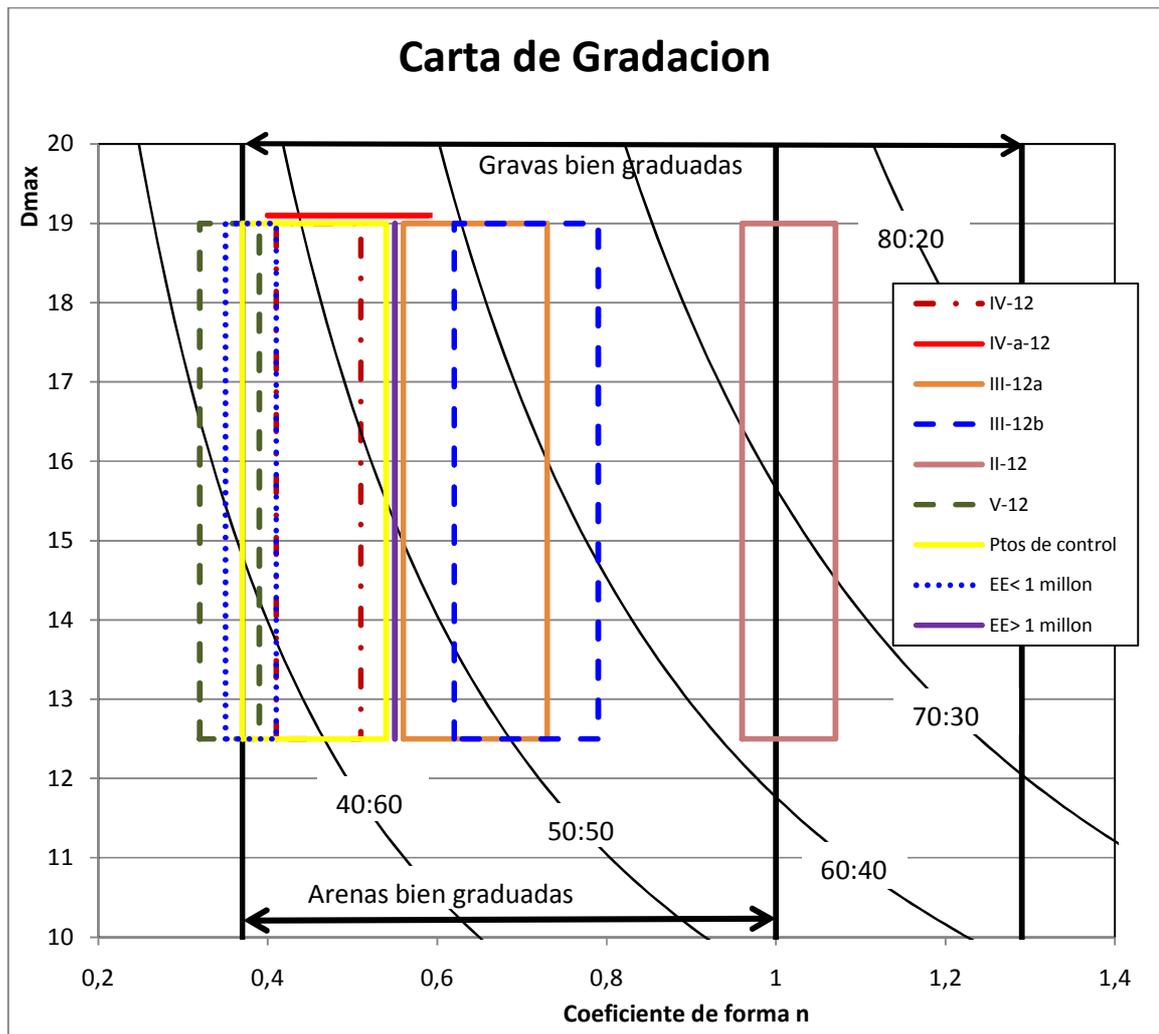


Grafico 2.9: Carta de gradación RAMCODES.

Se puede apreciar de la carta de gradación, que la representación punto-ámbito de la banda IV-a-12 es una línea horizontal, debido a que ambas granulometrías de la banda coinciden en el tamaño máximo, y que ocurre algo similar con la banda mexicana SCT de tránsito pesado, siendo su representación una línea vertical debido a que las granulometrías coinciden en el coeficiente de forma.

Según las recomendaciones de geomateriales bien graduados de RAMCODES, se desprenden los rangos recomendados para el coeficiente de forma n , de una banda granulométrica. Esta especificación no es cumplida ni por la banda tradicional V-12, ni por la banda mexicana SCT para ejes equivalentes acumulados menor a 1 millón. Coincidentemente ambas bandas son utilizadas para tránsito liviano, que aunque sus solicitudes son menores, el acotar una buena graduación de áridos en este caso, hace que la cantidad de áridos gruesos aumente y por lo tanto su costo económico por chancado del agregado sea menor. Se puede notar que la mayoría de las bandas se encuentran en las cercanías de una relación grava/arena balanceada.

CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Programa experimental

A continuación se presentan las 5 granulometrías escogidas para el desarrollo de los ensayos de laboratorio, que cuenta con 2 partes. En la primera de estas, se compactaran y medirán según el método de dosificación Marshall 9 probetas para cada granulometría, pero variando el grado de compactación (35, 50 y 75 golpes) y con un contenido de asfalto constante correspondiente a un 5,5% del peso de los áridos. En la segunda parte se eligen 3 granulometrías (las que dependerán de los resultados de la primera parte) para compactar 3 probetas con un contenido de asfalto de 6,0% y 5,0% , para una compactación constante de 75 golpes (lo que completara un set de 9 probetas con 3 contenidos de asfalto distinto), con el objetivo principal de estudiar el comportamiento del empaquetamiento de las partículas de la mezcla asfáltica con respecto al porcentaje de asfalto y además obtener el contenido de asfalto óptimo de cada una de las granulometrías.

Granulometría 1

Cumple con la banda granulométrica tradicional IV-A-12, no cumple con los requerimientos SUPERPAVE (Zona restrictiva, puntos de control y línea de máxima densidad) ni con los parámetros de la metodología Bailey.

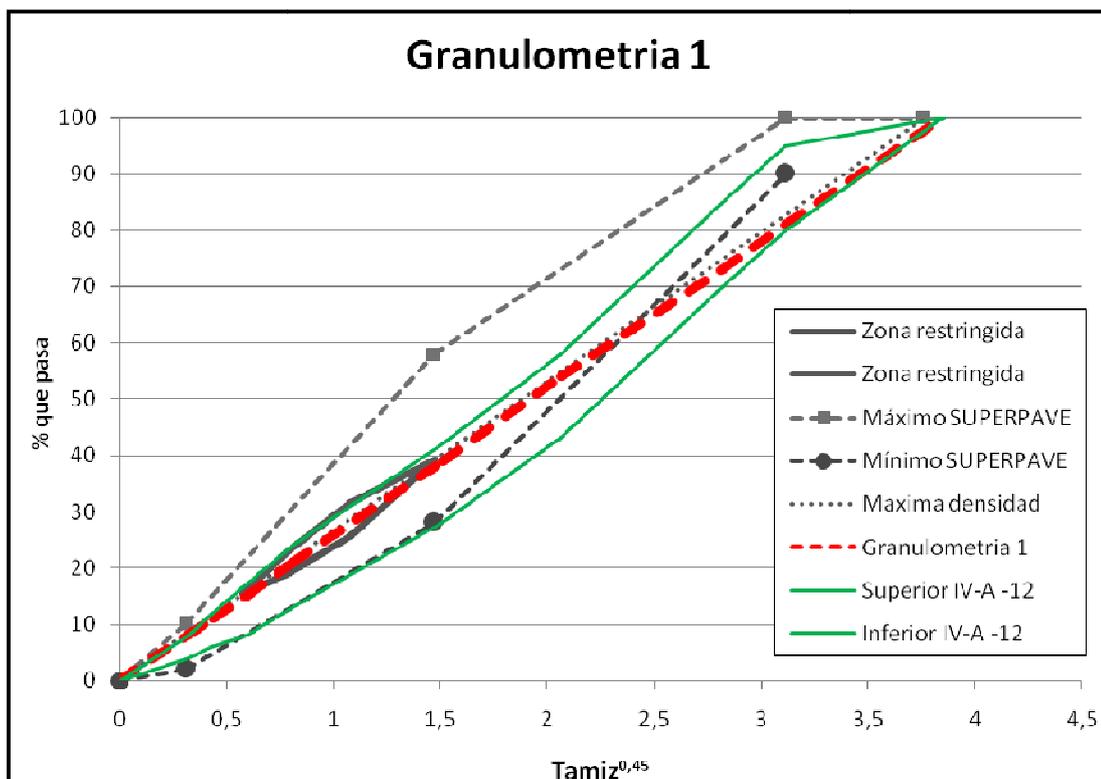


Gráfico 3.1: Granulometría experimental 1.

Del gráfico 3.1 se puede ver que la granulometría 1 prácticamente pasa por la línea de máxima densidad, lo que según la metodología SUPERPAVE se debe evitar ya que produce una cantidad de vacíos insuficientes para obtener un contenido de asfalto óptimo, pero esta gradación si cumple con la banda IV-A-12, por lo que se busca analizar el comportamiento de la mezcla asfáltica (% de asfalto óptimo, estabilidad ,fluencia y ahuellamiento) formada a partir de una gradación que es permitida en la práctica chilena , pero que bajo el enfoque SUPERPAVE no se pronostica un buen comportamiento.

Granulometría 2

Cumple con los requerimientos SUPERPAVE (Zona restrictiva, puntos de control y línea de máxima densidad) y con los parámetros Bailey. No cumple con la banda granulométrica tradicional IV-a-12.

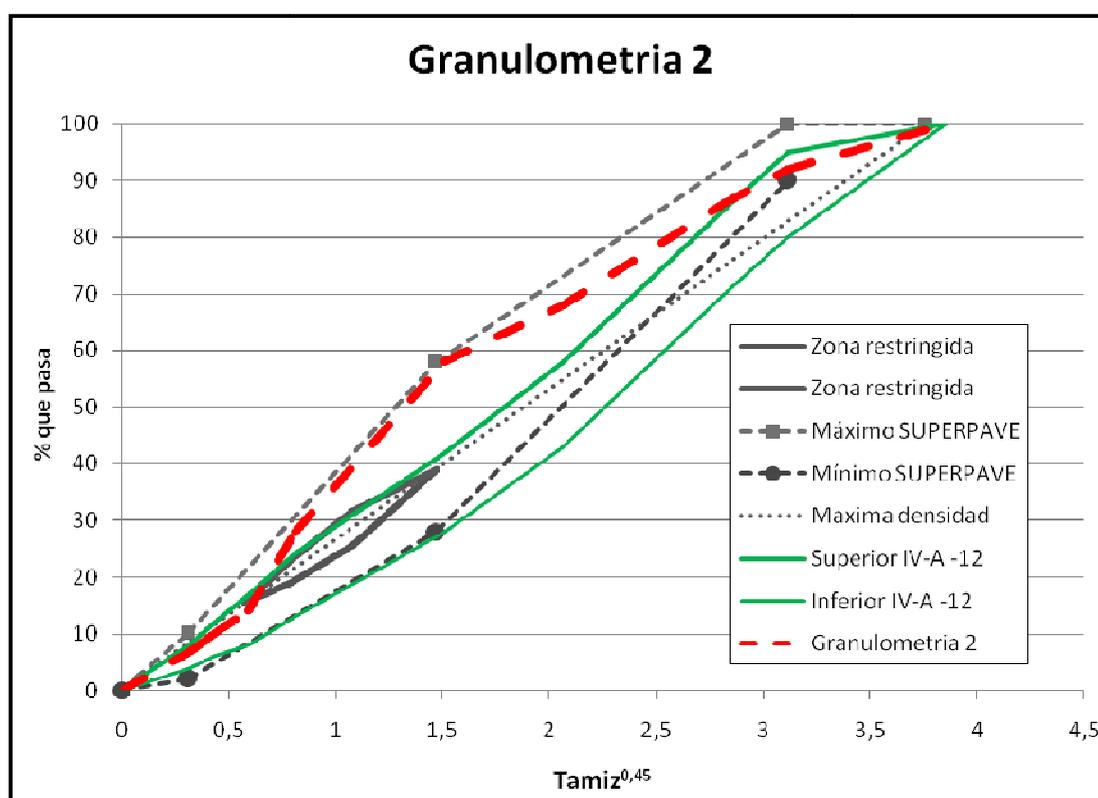


Gráfico 3.2: Granulometría experimental 2.

Esta granulometría del tipo densa (pasa por encima de la zona de restricción) que amplía el límite superior de requerimientos con respecto a la banda IV-A-12, por lo que se busca ensayar su comportamiento considerando que cumple con los métodos no tradicionales (SUPERPAVE y Bailey), de modo que de obtener buenos resultados (estabilidad, fluencia y ahuellamiento), se podría concluir que el límite superior de la banda granulométrica tradicional podría ser ampliado.

Granulometría 3

Esta granulometría sólo cumple con los parámetros de la metodología Bailey, ya que pasa por debajo de la banda IV-A-12 y los puntos de control (SUPERPAVE).

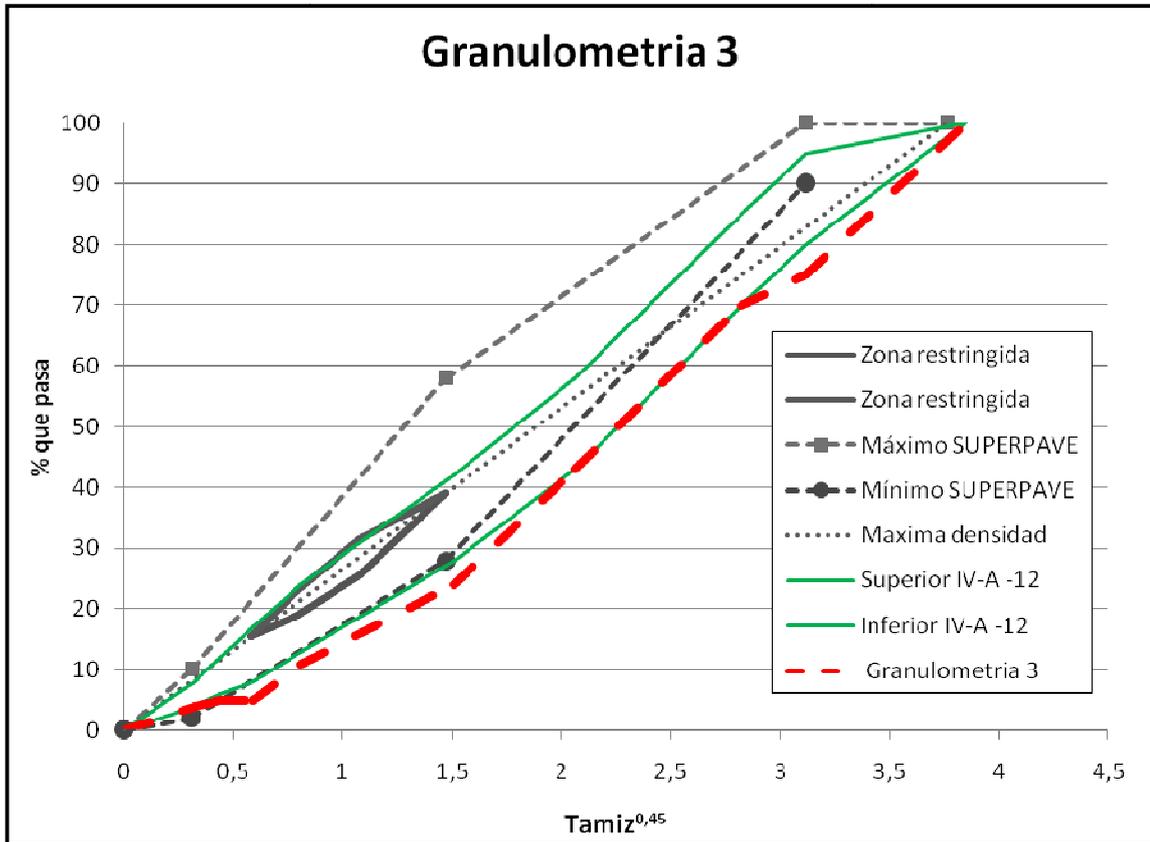


Grafico 3.3: Granulometría experimental 3.

Esta gradación es del tipo abierta (pasa muy por debajo de la zona de restricción) y busca analizar el comportamiento de la mezcla asfáltica para granulometrías que están debajo del límite inferior de la banda IV-A-12. Además se busca validar los parámetros de diseño del método Bailey, ya que esta gradación sólo cumple con los requisitos de esta metodología.

Granulometría 4

Esta granulometría sólo cumple con los requisitos de la metodología SUPERPAVE (Zona restrictiva, puntos de control y línea de máxima densidad), pasa por debajo de la zona de restricción y en el sector de los tamices mayores, pasa muy por encima de la banda IV-A-12.

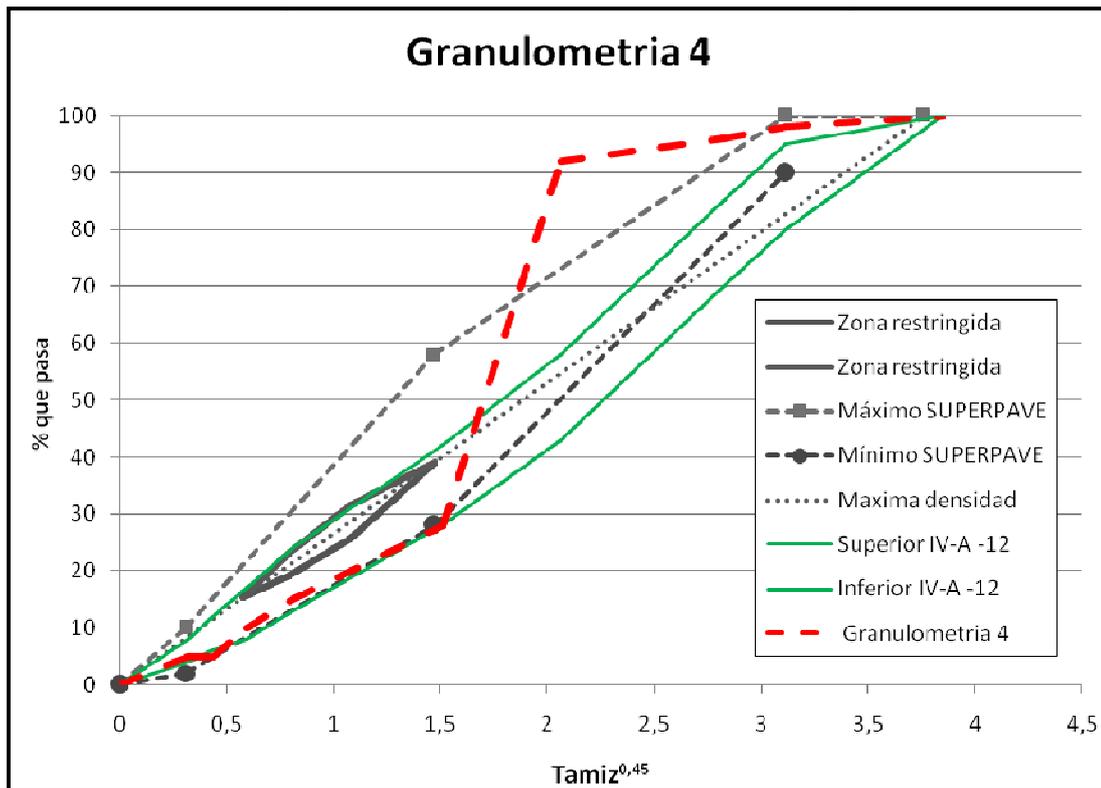


Gráfico 3.4: Granulometría experimental 4.

Esta gradación es del tipo discontinua y se busca analizar su comportamiento, ya que las restricciones de las bandas granulométricas de la práctica tradicional no las permiten.

Granulometría 5

Esta granulometría tiene la característica que cumple con todos los requerimientos de cada una de las metodologías y su comportamiento será el punto de referencia para comparar las mezclas confeccionadas con las otras 4 granulometrías.

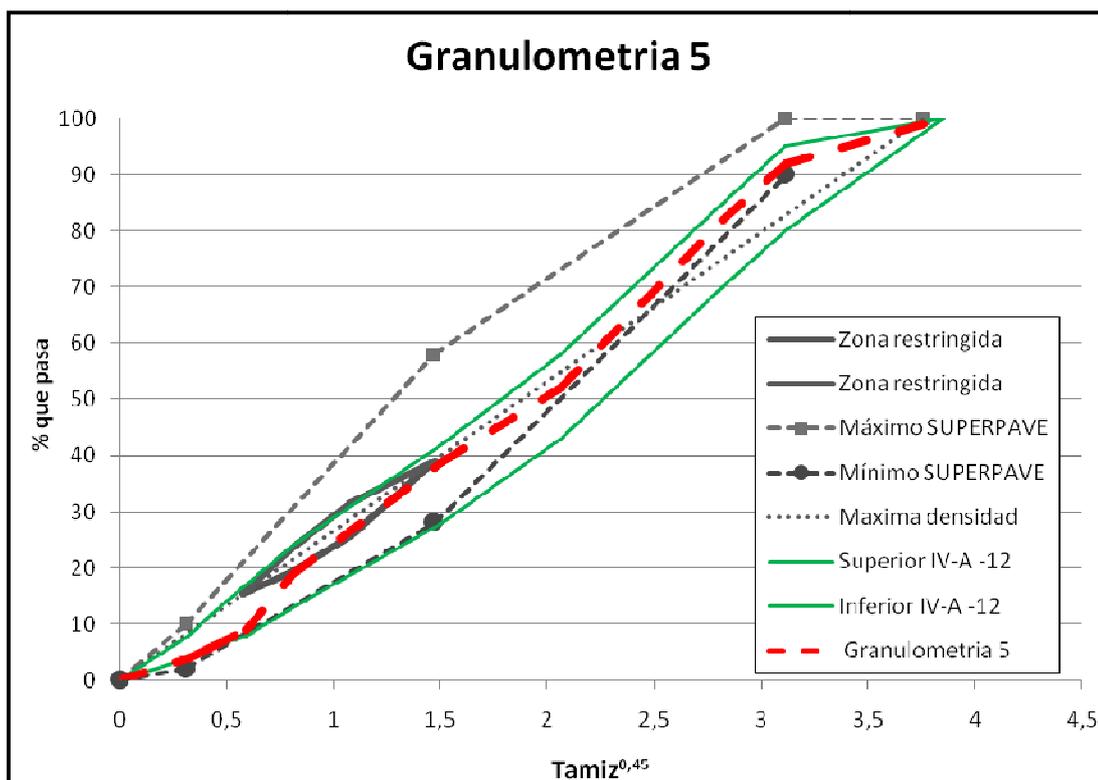


Gráfico 3.5: Granulometría experimental 5.

Los valores de los parámetros Bailey para cada una de las granulometrías, se encuentran en la tabla 3.1, siendo calculados a partir de las ecuaciones que se encuentran en el marco teórico. Los valores de las celdas oscurecidas cumplen con las recomendaciones de la metodología Bailey.

Tabla 3.1: Parámetros Bailey de las granulometrías experimentales.

	Granulometría 1	Granulometría 2	Granulometría 3	Granulometría 4	Granulometría 5
NMPS [mm]	20	12,5	20	5	12,5
CA Ratio	0,7	0,58	0,73	0,12	0,56
FA _c	0,51	0,48	0,35	0,52	0,49
FA _f	0,55	0,36	0,4	0,5	0,37
G/S	1	0,52	1,46	0,09	1

Además todas las granulometrías tienen un valor del parámetro G/S distinto (como se puede ver en la tabla 3.1), lo que permitirá corroborar la correlación de este parámetro con el comportamiento de las mezclas al ahuellamiento.

Para tener una idea de las 5 granulometrías utilizadas para los ensayos, se presenta el gráfico 3.6 en escala logarítmica en el eje de los tamices.

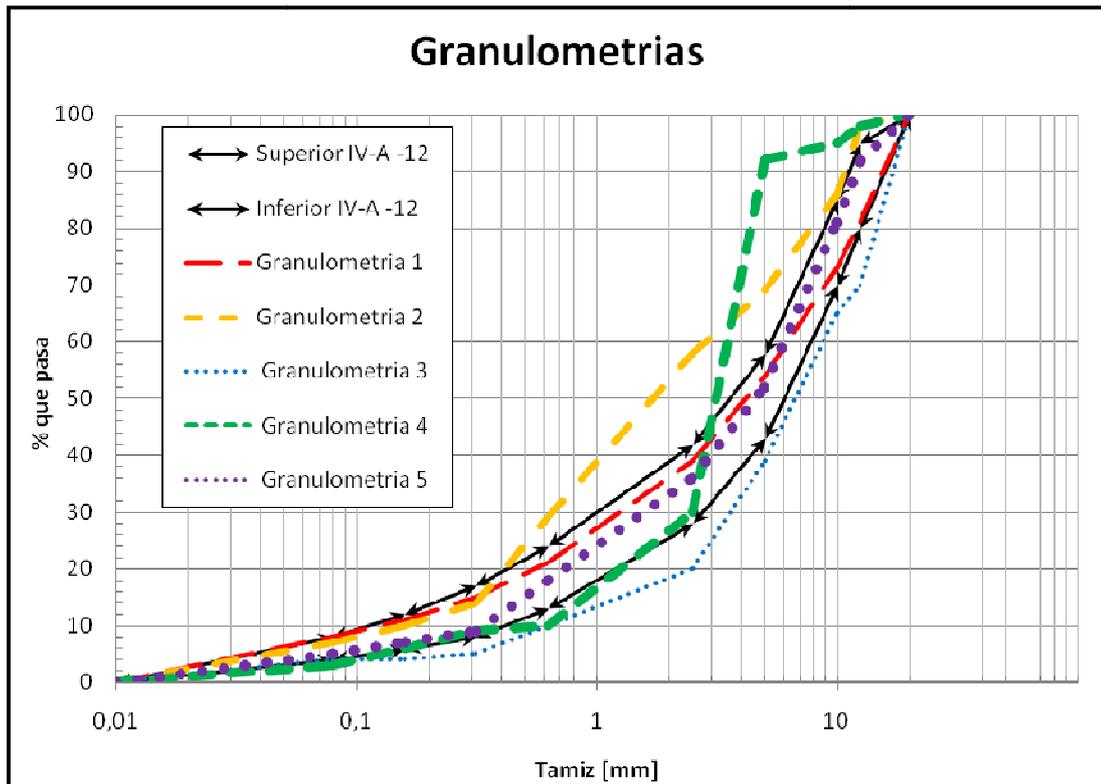


Gráfico 3.6: Comparación de las 5 granulometrías para ensayo.

La tabla 3.2 resume las 5 granulometrías explicadas anteriormente y utilizadas en el programa experimental.

Tabla 3.2: Granulometrías para ensayos, porcentaje que pasa cada tamiz.

Tamices		Granulometrías (% que pasa)				
ASTM	[mm]	1	2	3	4	5
3/4"	20	100	100	100	100	100
1/2"	12,5	81	92	75	98	92
3/8"	10	73	86	67	96	82
N° 4	5	54	68	43	92	52
N° 8	2,5	39	58	24	28	39
N° 30	0,63	21	28	11	15	19
N° 50	0,315	15	14	6	10	9
N° 100	0,16	11	10	5	5	7
N° 200	0,08	8	7	4	5	4

3.2 Caracterización de los materiales

Agregado mineral

El agregado mineral es parte fundamental en la mezcla asfáltica, determina las propiedades que esta tendrá y además representa cerca del 95% del volumen del conglomerado árido-ligante. La fracción fina de una granulometría para mezclas asfálticas está determinada por el material que pasa el tamiz N°8 y la fracción gruesa por el material retenido en esta malla. Generalmente se utiliza más de una fracción de áridos para ponderarlas y obtener la granulometría deseada. En el caso de este trabajo se utilizaron tres fuentes de áridos, Gravilla ¾", Integral de 3/8" y polvo de roca, los cuales fueron proporcionados por la empresa Mix Vial Ltda. , planta de Rancagua (Rio Cachapoal), pozo Leiva de extracción. La tabla que sigue muestra la granulometría de cada material empleado.

Tabla 3.3: Fuentes de áridos utilizadas en los ensayos.

Tamices				
ASTM	[mm]	Gravilla ¾"	Integral 3/8"	Polvo roca
¾"	20	100	100	100
½"	12,5	53	100	100
3/8"	10	26	100	100
N° 4	5	3	73	100
N° 8	2,5	1	42	100
N° 30	0,63	1	16	100
N° 50	0,315	1	12	98
N° 100	0,16	1	9	82
N° 200	0,08	1	7	47

Los ensayos para determinar las propiedades de cada fuente de áridos fueron realizados por IDIEM, y corresponden a agregados pétreos comúnmente utilizados por el laboratorio de mezclas asfálticas. El resultado de estas propiedades se encuentra en la tabla 3.4 que sigue.

Tabla 3.4: Propiedades de áridos utilizadas en los ensayos.

Ensayo	Unidad	Gravilla ¾"	Gravilla 3/8"	Polvo de Roca
DENSIDAD REAL SECA	(kg/m3)	2696,6	2693,8	2679,0
DENSIDAD NETA	(kg/m3)	2774,4	2779,5	2778,6
ABSORCIÓN DE AGUA	(%)	1,0	1,1	1,3
DENSIDAD APARENTE SUELTA	(kg/m3)	1505,9	1518,3	1659,3
DESGASTE DE LOS ANGELES	(%)	11,5	12,3	18,7
	(Grado)	5	6	7
DESINTEGRACION POR SULFATOS				
FRACCION GRUESA	(%)	0,1	0,3	---
FRACCION FINA	(%)	---	---	0,9
PARTICULAS CHANCADAS	(%)	98,3	99,7	100,0
PARTICULAS LAJEADAS	(%)	0,2	0,2	0,9
ÍNDICE DE LAJAS	(%)	14,5	16,0	21,5

Cemento asfáltico

El ligante utilizado corresponde a CA-24, partida 75002-33 de la empresa Shell Bitumen, quienes entregaron los resultados de las siguientes propiedades del ligante.

Tabla 3.5: Propiedades del ligante usado en los experimentales.

Ensayos	Resultado	Especificación	Norma	Manual de Carreteras
Viscosidad absoluta a 60 [°C], presión 300 [mm Hg]	3083	Min. 2400	NCh 2336	8.302.15
Ductilidad a 25 [°C], velocidad 5 cm/min, [cm]	>150	Min. 100	NCh 2342	8.302.8
Ensayo de la Mancha con Hep./Xil., [%xilo]	<30	Max. 30	NCh 2343	8.302.7
Punto de inflamación copa abierta [°C]	288	Min. 232	NCh 2338	8.302.9
Punto de ablandamiento [°C]	49,8		NCh 2337	8.302.16
Índice de penetración (IP)	-0,6	-1,5 a 1,0		8.302.18
Solubilidad en tricloroetileno [%]	>99	Min. 99	NCh 2341	8.302.11
Densidad, 25 [°C], [Kg/m³]			NCh 2333	8.302.2

Tabla 3.6: Propiedades del ensayo de película delgada rotatoria.

Ensayo de Película delgada rotatoria	Resultado	Especificación	Norma	Manual de Carreteras
Perdida por calentamiento [%]	0,1	Max. 0,8	NCh 2346	8.302.33
Viscosidad absoluta a 60 [°C], presión 300 [mm Hg]	6301	-----	NCh 2336	8.302.15
Ductilidad a 25 [°C], 5 cm/min [cm]	>150	Min. 100	NCh 2342	8.302.8
Índice de durabilidad (ID)	2	Max. 3,5		8.302.33

Tabla 3.7: Propiedades de viscosidad.

Curva de viscosidad	Resultado	Norma	Manual de Carreteras
Viscosidad Brookfield 120 [°C], 30 [rpm], 59,5% torque, [cP]	992	ASTM D4402	8.302.24
Viscosidad Brookfield 135 [°C], 50 [rpm], 43,8% torque, [cP]	438	ASTM D4402	8.302.24
Viscosidad Brookfield 150 [°C], 100 [rpm], 45,1% torque, [cP]	226	ASTM D4402	8.302.24
Temperatura de mezclado, para 1,7 [P], (± 3 [°C])	155		8.302.18
Temperatura de compactación para 2,8 [P], (± 3 [°C])	145		8.302.18

Cortes de áridos utilizados

Debido a que con las tres fuentes de áridos (gravilla ¾", gravilla 3/8" y Polvo de roca) proporcionadas por la empresa Mix Vial Rancagua, fue muy difícil ponderar para obtener las granulometrías deseadas y además para obtener precisión en los porcentajes que aporta cada tamaño de árido, se decidió cortar cada tamaño de árido a utilizar y debido a que esta tarea era muy lenta para tamaños de áridos bajo el tamiz N°8, se decidió cortar todo el agregado del Polvo de roca que pasara dicho tamiz y realizar el ensayo de granulometría por lavado según el método 8.202.3 del Manual de Carreteras, con lo cual se evitaría cortar por tamizado una gran cantidad de agregados finos.

La granulometría del "Polvo Roca bajo N°8", realizada por medio de granulometría por lavado, a una muestra de 857,4 [gr], se muestra a continuación.

Tabla 3.8: Granulometría polvo de roca bajo tamiz N°8.

Tamices		Polvo Roca (Granulometría)		
ASTM	[mm]	Peso g	% retenido	% pasa
N° 30	0,63	417,8	48,7	51,3
N° 50	0,315	117,5	13,7	37,6
N° 100	0,16	100,8	11,8	25,8
N° 200	0,08	66,5	7,8	18,1
% que pasa N° 200		154,8	18,1	

En la tabla 3.9 se detallan los porcentajes retenidos usados de cada corte de áridos para obtener con la mezcla de estos cada una de las cinco granulometrías.

Tabla 3.9: Granulometría polvo de roca bajo tamiz N°8.

ASTM	% Retenido				
	G1	G2	G3	G4	G5
1/2"	19,0	8,0	25,0	2,0	8,0
3/8"	8,0	6,0	8,0	2,0	10,0
N° 4	19,0	18,0	24,0	4,0	30,0
N° 8	15,0	10,0	19,0	64,0	13,0
Polvo Roca bajo N°8	28,9	26,1	5,0	24,9	21,1
N° 30	3,9	17,4	10,6	0,8	9,8
N° 50	2,0	10,4	5,3	1,7	7,0
N° 100	0,8	0,6	0,0	0,0	0,4
N° 200	0,8	1,2	0,0	0,0	0,4
% que pasa N° 200	2,7	2,3	3,1	0,6	0,4

La tabla 3.10 compara la granulometría teórica y la real obtenida en laboratorio, obtenida por la mezcla de fracciones de áridos antes mencionada y medida por medio del proceso de granulometría por lavado.

Tabla 3.10: Granulometría 1 teórica vs real.

Tamices		Granulometría 1, teórica	Granulometría 1, real
ASTM	[mm]		
3/4"	20	100	100
1/2"	12,5	81	81
3/8"	10	73	73,3
N° 4	5	54	54,4
N° 8	2,5	39	39,4
N° 30	0,63	21	21,4
N° 50	0,315	15	15,3
N° 100	0,16	11	11,5
N° 200	0,08	8	8,9

Se puede ver que el error máximo es menor al 1%, que es lo mínimo que se pudo conseguir bajo condiciones de laboratorio, y que corresponde al porcentaje que pasa el tamiz N° 200, el cual es muy difícil de medir debido a su tamaño y a la adherencia de esta fracción de áridos en los poros de los agregados de mayor tamaño.

Debido a que no fue posible obtener una ponderación para mezclar directamente, se debió obtener las densidades de los áridos para cada una de las granulometrías, lo cual se realizó obteniendo una muestra de cada una de las cinco gradaciones, tanto para la fracción gruesa como para la fina de acuerdo a los métodos del Manual de Carreteras 8.202.20 y 8.202.21, respectivamente.

Densidad real seca de las granulometrías

Debido a que se realizaron cortes de áridos para formar cada granulometría, se debió realizar los ensayos correspondientes a densidad real seca. Las siguientes tablas muestran los resultados por separado tanto para los áridos gruesos y finos.

Tabla 3.11: Densidad Real Seca del Material Grueso.

Granulometrías	G1	G2	G3	G4	G5
Mása Árido Sumergido A [g]	638	633	639	637	639
Mása Árido Sat. Superficialmente Seco B [g]	1004	998	1004	1004	1005
Mása Árido Seco C [g]	995	987	996	995	995
$\rho_{RS} = C/(B-A)$ [Kg/m ³]	2723	2711	2727	2711	2717

Tabla 3.12: Densidad Real Seca del Material Fino.

Granulometrías	G1	G2	G3	G4	G5
Mása Muestra Seca, ms [g]	333	327	342	383	331
Mása Muestra Sat. Superficialmente Seca, msss [g]	335	333	345	388	334
Mása Matraz + Agua, Ma [g]	663	663	663	663	663
Mása Matraz + muestra + agua, Mm [g]	870	864	879	906	873
$\rho_{RS} = ms/(Ma+msss-Mm)$ [Kg/m3]	2592	2473	2652	2628	2667

Debido a que las 5 granulometrías presentaban una gran cantidad de áridos retenida en el tamiz N°8, por recomendación de laboratorio, se decidió incluir el material retenido en dicho tamiz al material fino. De esto modo las ponderaciones y densidades reales secas para cada granulometría se muestran a continuación.

Tabla 3.13: Densidad Real Seca del Material Fino.

Ponderación ρ_{RS}	G1	G2	G3	G4	G5
Árido grueso [%]	46	32	57	8	48
Árido fino [%]	54	68	43	92	52
ρ_{RS} [Kg/m3]	2652	2549	2695	2634	2691

3.3 Contenido de asfalto óptimo

A continuación se presentaran los resultados de la dosificación según el procedimiento tradicional Marshall para las granulometrías 1, 3 y 4, de acuerdo a los requisitos de una banda IV-a-12 de tránsito pesado para las variables de estabilidad, fluencia, densidad, huecos de aire y vacíos del agregado mineral VAM.

El análisis a cada mezcla se realizara según los requerimientos del método tradicional chileno para carreteras (numeral 5.408.203 del M.C.), a pesar de que la granulometría de algunas mezclas no cumple con las bandas tradicionales. Estos requerimientos se resumen en las tablas de a continuación:

Tabla 3.14: Requerimientos tradicionales para dosificación.

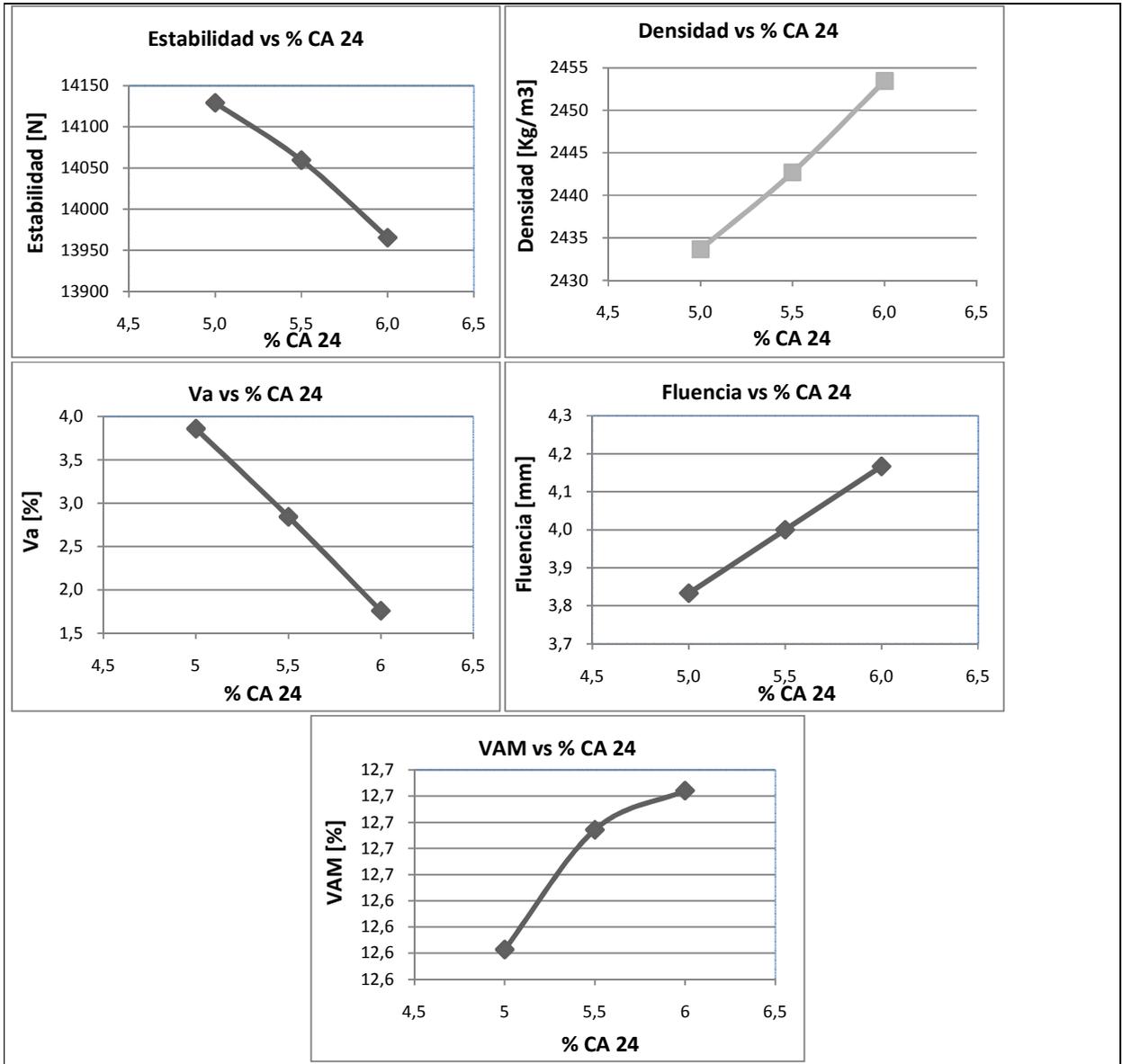
Propiedad	Rodadura	Intermedia	Base Gruesa	Superficie fina
Huecos [%]	4,0 - 6,0	3,0 - 8,0	5,0 - 10,0	3,0 - 8,0
Fluencia [mm]	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0
Estabilidad [N]	9000	8000	6000	4000

Tabla 3.15: Requerimientos tradicionales para los VAM.

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

En cada uno de los esquemas que siguen se grafican los valores medidos para cada set de 9 probetas.

Granulometría 1



Esquema 3.1: Dosificación granulometría 1.

La tabla 3.16 entrega el contenido óptimo encontrado para la granulometría de máxima densidad.

Tabla 3.16: Contenido óptimo de asfalto para la granulometría 1.

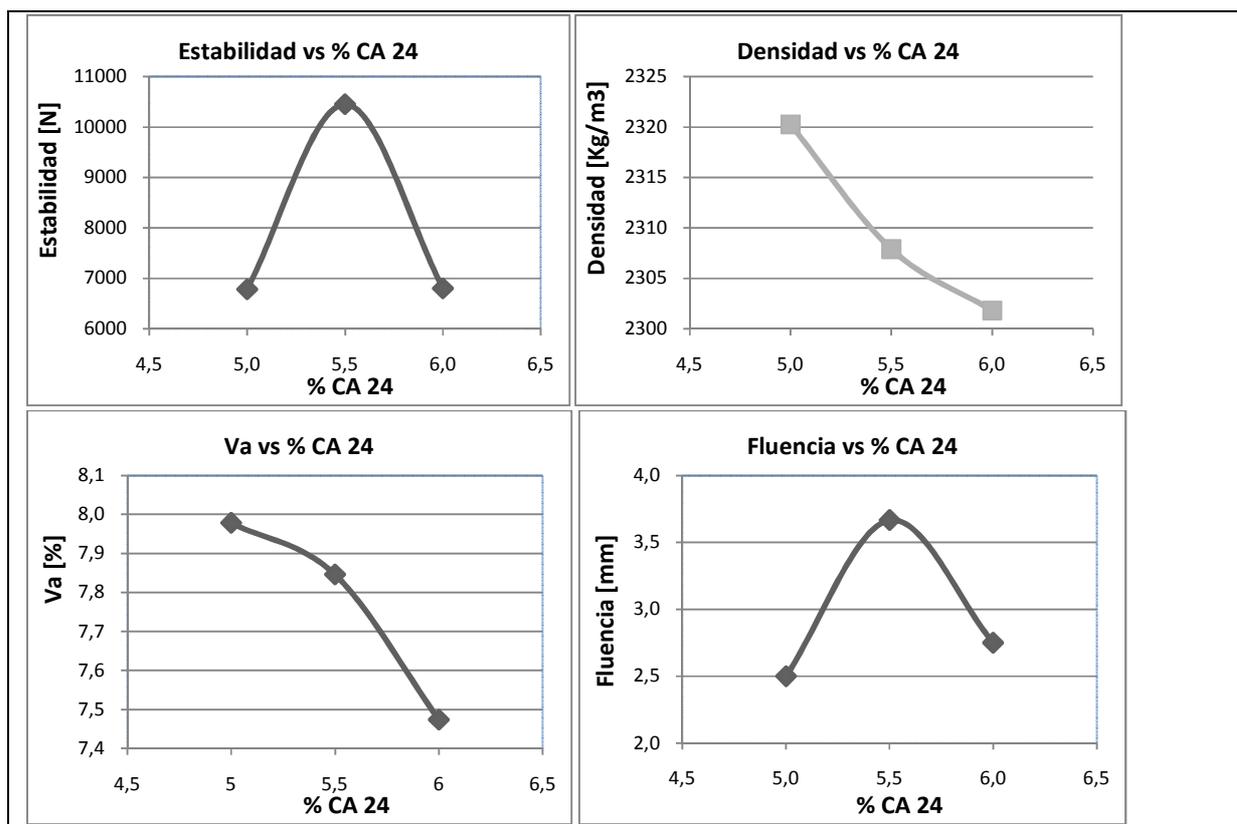
Para máxima densidad [%]	6,0
Para máxima estabilidad [%]	5,0
Para 3,9% de huecos	5,0
Promedio	5,3

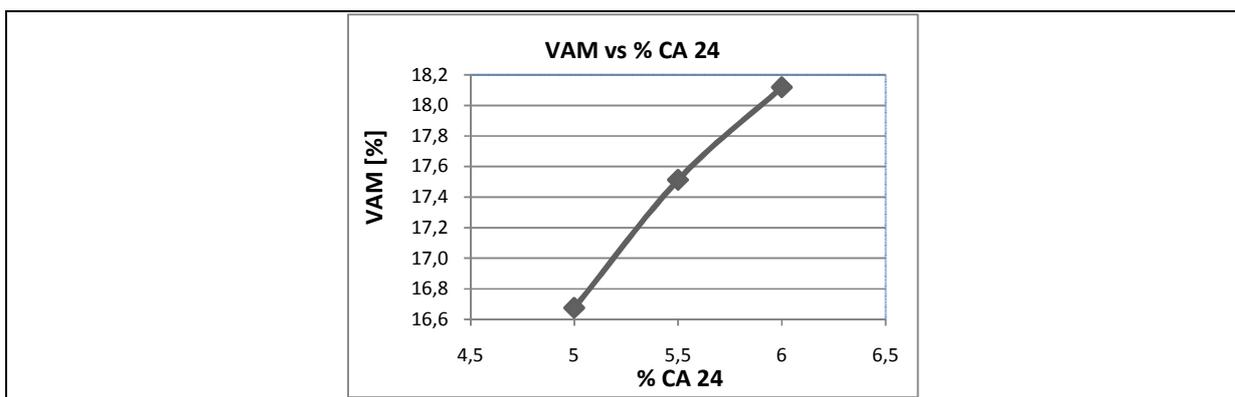
La metodología SUPERPAVE supone una insuficiencia en la cantidad de huecos para una mezcla asfáltica constituida con una granulometría como la 1 (máxima densidad). De la tabla que sigue esto se puede corroborar, ya que para ninguna capa asfáltica se cumple con el contenido mínimo de VAM y su crecimiento con el contenido de asfalto es insuficiente como para alcanzar el valor mínimo de 14 %. Además para la mezcla asfáltica más exigente en términos de requerimientos, no se cumple con los huecos mínimos. Sería importante tener una referencia acerca de cuál es el rango de granulometrías cercanas a la de máxima densidad, para el cual la cantidad de huecos y VAM se hace insuficiente para generar una capa de rodadura, ya que se podría incluir esta limitación a la banda IV-a-12.

Tabla 3.17: Análisis de la dosificación para la mezcla 1.

Propiedad	Para 5,3% de CA	Rodadura	Intermedia	Base Gruesa	Superficie fina
Huecos [%]	3,3	4,0 - 6,0	3,0 - 8,0	5,0 - 10,0	3,0 - 8,0
Fluencia [mm]	3,9	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0
Estabilidad [N] mínimo	14090,4	9000	8000	6000	4000
VAM [%] mínimo	12,7	14	14	14	14

Granulometría 3





Esquema 3.2: Dosificación granulometría 3.

Para esta granulometría que sólo cumple con los parámetros de la metodología Bailey, el porcentaje de asfalto óptimo resultó ser 5,5. Además para los porcentajes de asfalto ensayados se encontró un valor máximo de estabilidad.

Tabla 3.18: Contenido óptimo de asfalto para la granulometría 3.

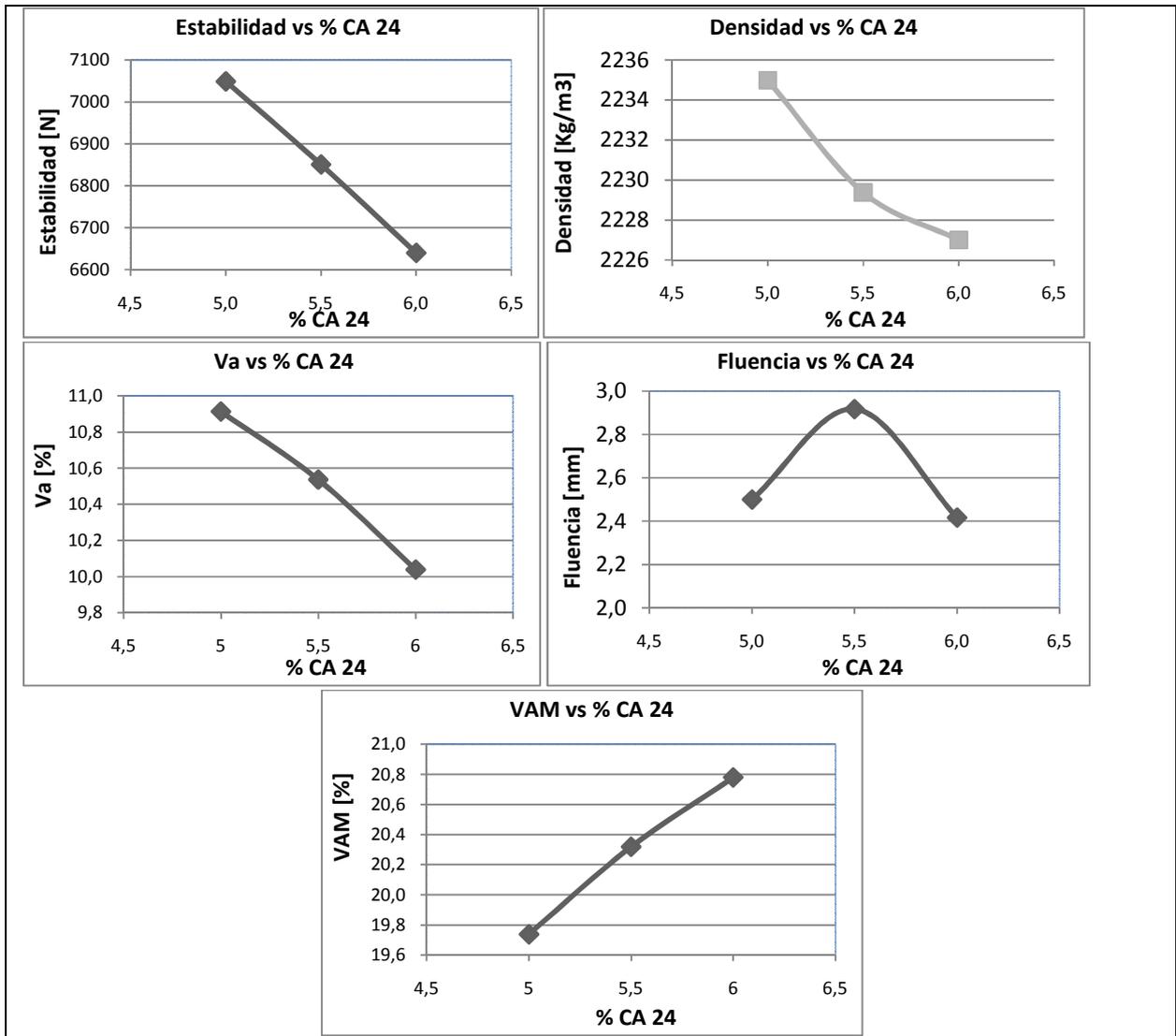
Para máxima densidad [%]	5,0
Para máxima estabilidad [%]	5,5
Para 7,5% de huecos	6,0
Promedio	5,5

Esta granulometría que corresponde a la más gruesa de las cinco estudiadas, no cumple con los huecos máximos requeridos para una mezcla que se use como capa de rodadura como se puede ver en la tabla que sigue. Por otro lado, el aumento en el contenido de asfalto tiende a disminuir los huecos, pero también hace disminuir la estabilidad de la mezcla a una tasa más rápida, lo que implica un incumplimiento con los requerimientos de estabilidad mínimos. El incumplimiento en los requisitos máximos de huecos en la mezcla para una capa de rodadura, se pueden justificar con el hecho de que la granulometría 3, cumple con los 3 parámetros Bailey al límite de lo permitido por esta metodología, por lo que para la capa asfáltica superficial, la cual resulta ser la más exigente en cuanto a propiedades, estos parámetros deberían ser más analizados para aceptarlos en una normativa.

Tabla 3.19: Análisis de la dosificación para la mezcla 3.

Propiedad	Para 5,5% de CA	Rodadura	Intermedia	Base Gruesa	Superficie fina
Huecos [%]	7,8	4,0 - 6,0	3,0 - 8,0	5,0 - 10,0	3,0 - 8,0
Fluencia [mm]	3,7	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0
Estabilidad [N] mínimo	10453,0	9000	8000	6000	4000
VAM [%] mínimo	17,5	14	14	14	14

Granulometría 4



Esquema 3.3: Dosificación granulometría 4.

Tabla 3.20: Contenido óptimo de asfalto para la granulometría 4.

Para máxima densidad [%]	5,0
Para máxima estabilidad [%]	5,5
Para 10,0% de huecos	6,0
Promedio	5,5

Esta granulometría discontinua, es la que más se aleja en el cumplimiento de los parámetros del método Bailey. Estos motivos explican el alto contenido de huecos en esta mezcla, lo que como se puede observar en la tabla que sigue, hace que no cumpla con los requisitos máximos de este parámetro. En esta gradación de áridos, el tamaño de árido retenido en el tamiz número 8, corresponde al 64% del total de áridos, por lo que se puede inferir que el empaquetamiento en mezclas con un predominio de algún tamaño de áridos gruesos es insuficiente. Con estos resultados se puede pensar que los límites impuestos por los puntos de control de la metodología SUPERPAVE son insuficientes para cumplir con los requerimientos tradicionales para mezclas asfálticas, todo esto teniendo en cuenta que la dosificación de la mezcla se realizó bajo los estándares del Manual de Carreteras de Chile.

Tabla 3.21: Análisis de la dosificación para la mezcla 4.

Propiedad	Para 5,5% de CA	Rodadura	Intermedia	Base Gruesa	Superficie fina
Huecos [%]	10,5	4,0 - 6,0	3,0 - 8,0	5,0 - 10,0	3,0 - 8,0
Fluencia [mm]	2,9	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0
Estabilidad [N] mínimo	6851,0	9000	8000	6000	4000
VAM [%] mínimo	20,3	14	14	14	14

3.4 Análisis de la compactación

Del gráfico 3.7 se puede observar que efectivamente la granulometría 1 desarrolla la mezcla asfáltica con mayor densidad independiente del nivel de compactación y como se ve en el análisis de dosificación, también independientemente del contenido de asfalto. También se puede observar que el nivel compactación tiene mayor influencia en mezclas con granulometría con un contenido de áridos finos alto, como lo son las granulometrías 2,1 y 5 en orden descendente.

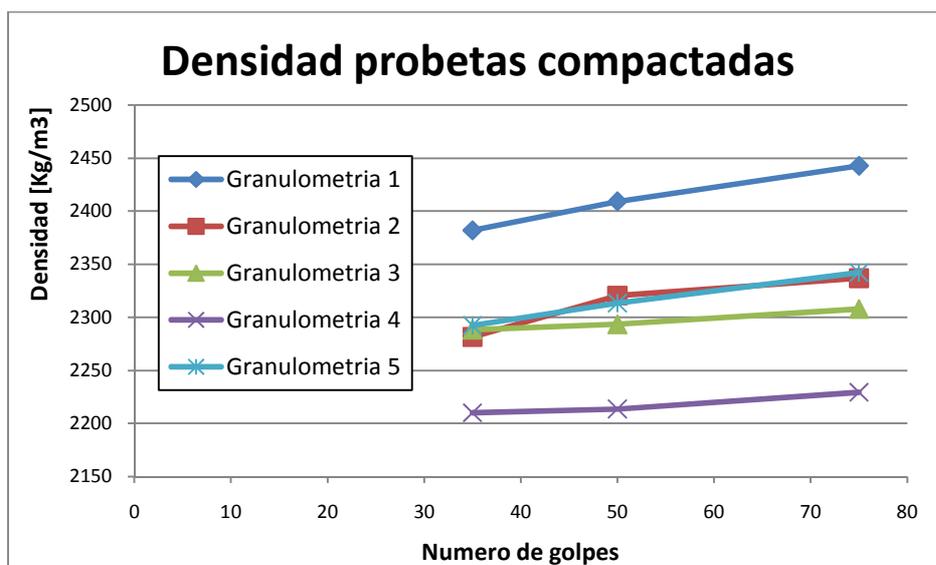


Gráfico 3.7: Densidad vs compactación.

Se puede notar que la mezcla asfáltica cuatro genera la menor resistencia a la compresión de la prensa Marshall, siendo su magnitud insuficiente a los requisitos mínimos pedidos por el Manual de Carreteras. El esqueleto granular generado por la granulometría 1 es el más fuerte, por lo que además de generar la máxima densidad, también desarrolla la máxima estabilidad. Además, para esta mezcla asfáltica 1, se produce la mayor variación de resistencia con respecto al nivel de compactación desarrollado sobre esta, lo que hace suponer que lograr un acomodo óptimo de los distintos tamaños de áridos requiere un esfuerzo mayor, en comparación al resto de las mezclas, en donde se puede ver del gráfico, que la diferencia en la estabilidad entre una compactación de 50 y 75 golpes es baja, y que la tendencia sería mantener constante, mientras que en el caso de la granulometría 1, la pendiente entre los puntos generados por la compactación de 50 y 75 golpes es mayor y se podría pensar en que esa tendencia continuase al desarrollar mayor compactación en la mezcla.

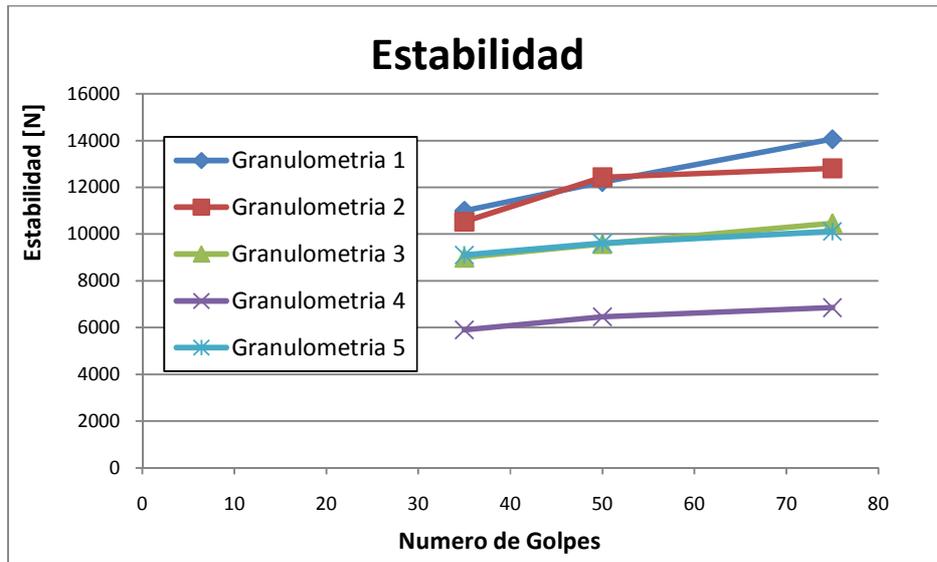


Grafico 3.8: Estabilidad vs compactación.

Es importante notar que los requisitos de fluencia (rango de 2 a 4 [mm]), se cumplen para todas las granulometrías y compactaciones, lo que hace suponer que esta propiedad esta mayormente influenciada por el tipo de ligante asfáltico usado en la mezcla.

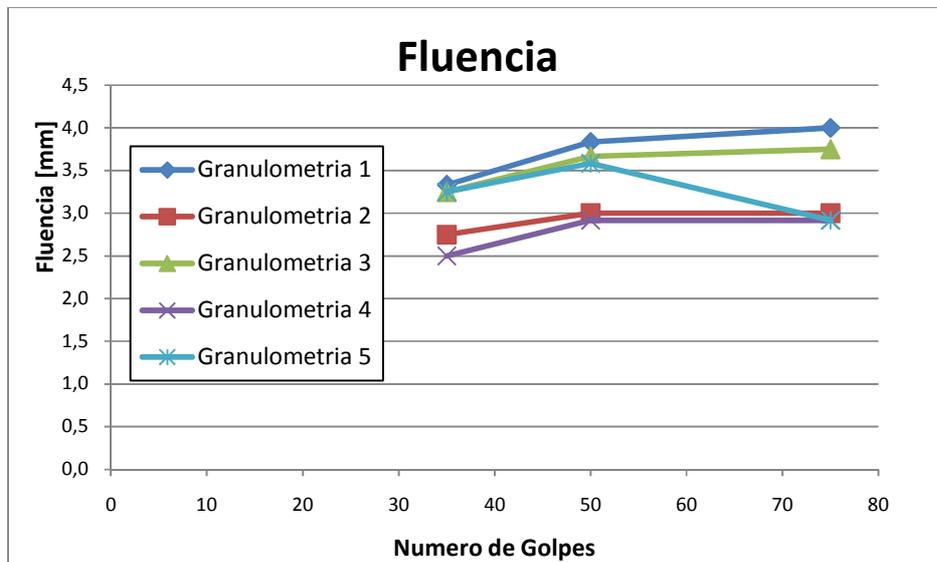


Grafico 3.9: Fluencia vs compactación.

Se confirma que la granulometría 1 requiere mayor compactación para estabilizarse como mezcla. En el gráfico 3.10 se puede ver que el resto de las mezclas tienden a mantener un valor de vacíos mientras aumenta la compactación, mientras que la mezcla 1 cambia más bruscamente los huecos de la mezcla. Del gráfico se puede además concluir que las granulometrías 2,3 y 5 no cumplen con los requisitos de vacíos para una capa de rodadura, por lo que se estima que el porcentaje de asfalto óptimo para estas mezclas debe estar sobre el 5,5%, pensando en que la tendencia típica es disminuir los huecos de la mezcla con el aumento en el contenido de asfalto.

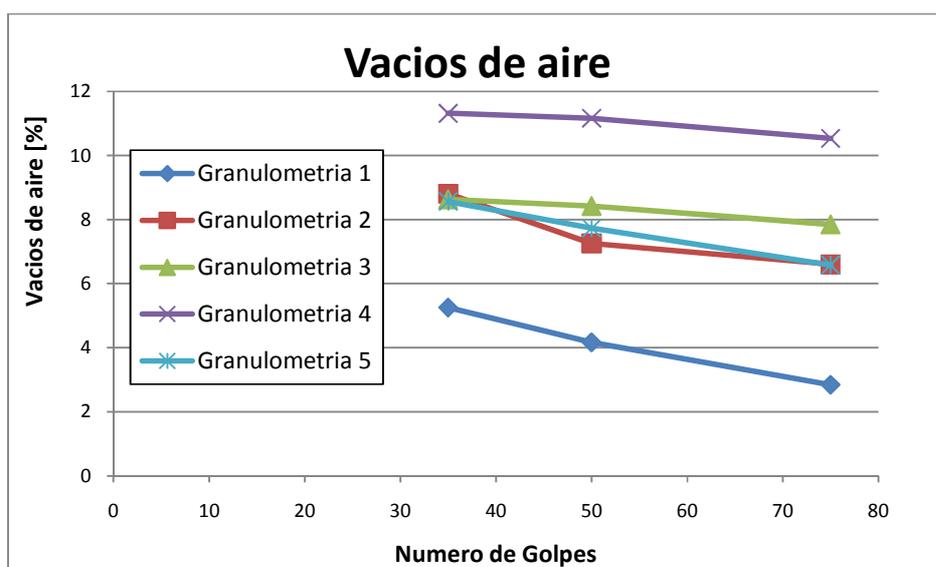


Gráfico 3.10: Vacíos de aire vs compactación.

En general se puede observar que las mezclas más cerradas tienden a tener los menores vacíos en el agregado mineral debido a la mayor porosidad que presentan los áridos de mayores tamaños.

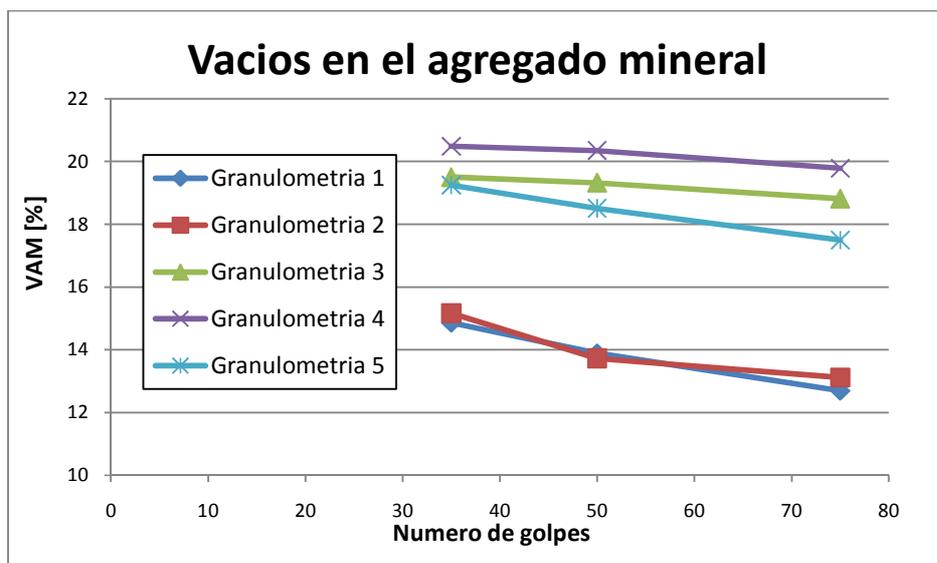


Grafico 3.11: Vacíos en el agregado mineral vs compactación.

De los gráficos que siguen se puede observar que sólo la granulometría 1 cumple con desarrollar mezclas con vacíos llenos con asfalto mayor a 65 %, que corresponde al requisito mínimo de la metodología SUPERPAVE. Es interesante notar para aumentar los vacíos llenos con asfalto, se necesita aumentar el contenido de asfalto en la mezcla, sin embargo, las granulometrías 3 y 4 no alcanzan a obtener vacíos llenos con asfaltos mayores a 65%, para porcentajes de contenido de asfalto de 6%.

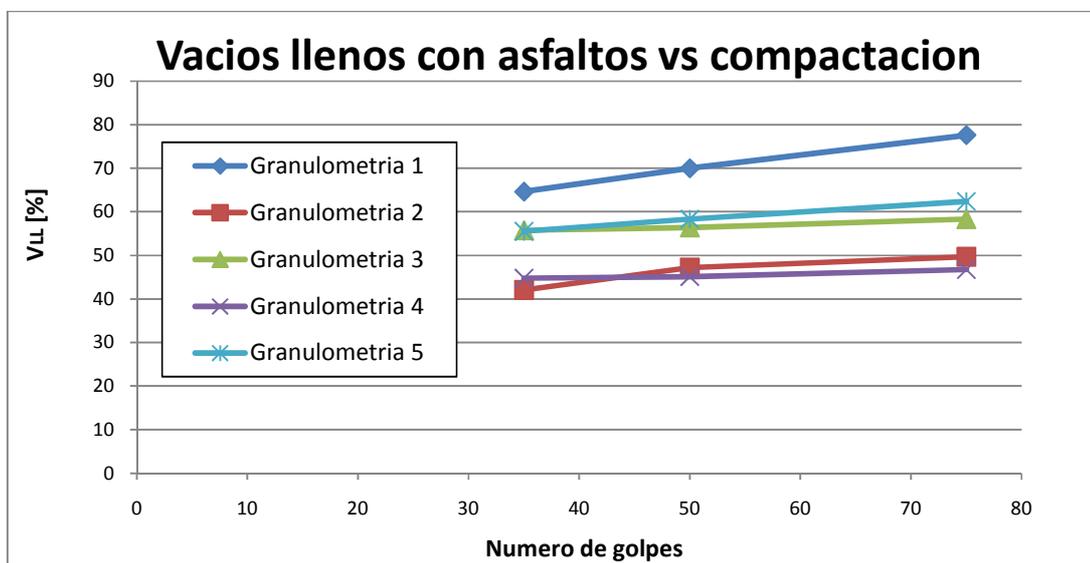


Grafico 3.12: Vacíos llenos con asfaltos vs compactación.

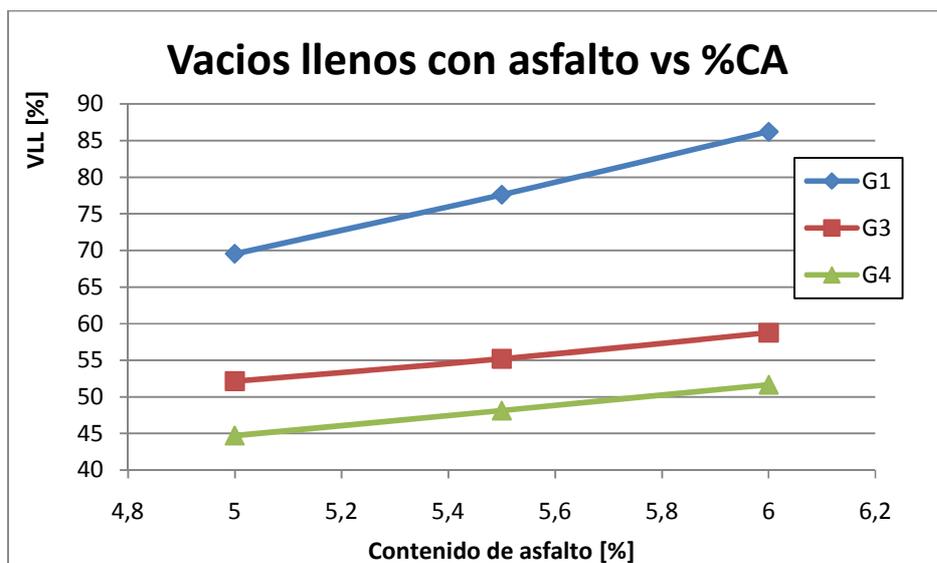


Gráfico 3.13: Vacíos llenos con asfaltos vs cantidad de asfalto.

Se puede observar del conjunto de gráficos que la granulometría 4 es la que tiene las propiedades más deficientes, lo que corrobora el hecho que granulometrías con discontinuidades marcadas generan un empaquetamiento pobre en la mezcla.

Por otro lado se puede estimar por la tendencia y valores de los gráficos de estabilidad, VAM y huecos, además de las curvas típicas de estas propiedades en función del contenido de asfalto, que las granulometrías 2 y 5 (a las cuales no se realizó dosificación) tienen su porcentaje óptimo de asfalto por encima del 5,5% estudiado en esta sección y que lo más seguro es que para ese porcentaje óptimo se cumpla con los requerimientos más exigentes correspondientes a una carpeta de rodadura.

La tabla 3.22 muestra los resultados del ensayo de densidad máxima de las mezclas asfálticas sin compactar, realizado según la metodología expuesta en el numeral 8.302.37 del Manual de Carreteras. Se puede notar que la diferencia entre los valores obtenidos no es grande, para la máxima densidad que podría alcanzar la mezcla, sin embargo, los valores obtenidos para las densidades compactadas de cada mezcla si tiene variaciones significativas como se pueden ver en el gráfico de densidad de probetas compactadas, lo que implica una influencia directa de la granulometría en la densidad alcanzada por una mezcla asfáltica.

Tabla 3.22: Densidad máxima no compactada de cada mezcla ensayada.

Mezcla	Dmm [Kg/m3]
Granulometría 1	2514
Granulometría 2	2502
Granulometría 3	2504
Granulometría 4	2492
Granulometría 5	2507

Con el objetivo de tener un parámetro que reflejara la capacidad superficial que tiene una mezcla para absorber agua, se calculo la diferencia de peso entre la probeta saturada superficialmente seca y seca. Estos valores se resumen en el grafico 3.14, para las 5 mezclas, con el contenido de asfalto tipo de 5,5% y variación en la cantidad de golpes de compactación. Se puede ver que todas las granulometrías tienden a cerrarse superficialmente con el nivel de compactación a una tasa parecida, excepto la granulometría 1, la cual prácticamente no se ve afectada en este parámetro con el nivel de compactación y además presenta la absorción superficial de agua más baja. Hay que acotar que la absorción de agua fue sobre toda la superficie de la probeta cilíndrica y que para lograr este estado se mantuvo la probeta sumergida durante 3 minutos, lo que es distinto a las condiciones de saturación que se ve enfrentada una carpeta asfáltica de rodadura en condiciones de lluvia. Sin embargo, este parámetro podría ser útil, para clasificar la capacidad de absorción y drenaje de una mezcla asfáltica drenante.

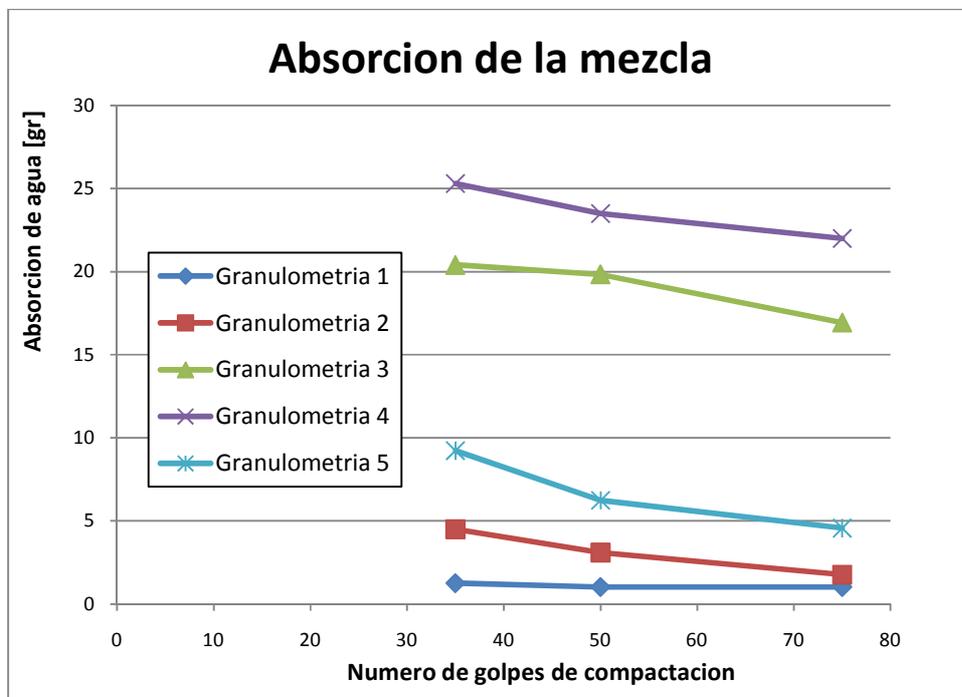


Grafico 3.14: Absorción de agua de las mezclas ensayadas.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Del análisis teórico de comparación entre la metodología Bailey y las bandas granulométricas tradicionales, se comprueba la hipótesis acerca de incluir los requerimientos de los parámetros Bailey, ya que entregan restricciones complementarias al uso de bandas granulométricas, acotando así el uso de granulometrías que presentan un empaquetamiento de sus áridos más resistente, con menor segregación de la mezcla y mayor facilidad a la compactación en terreno.

La norma mexicana SCT presenta un sistema de bandas granulométricas similar al presentado en el Manual de Carreteras chileno. Sin embargo, a pesar de que las bandas para tránsito pesado y liviano de ambas normativas coinciden en forma, la normativa mexicana cumple con todas las restricciones SUPERPAVE y además especifica el uso de cada granulometría por cantidad de ejes equivalentes a los cuales la carpeta será solicitada. Por otro lado cada banda granulométrica de la norma mexicana para el tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ ", se encuentran contenidas en los puntos de control, siempre evitando la línea de máxima densidad y la zona de restricción.

De la representación de las bandas granulométricas en la carta de gradación RAMCODES, se encontró que la mayoría de ellas cumplen con el rango de arenas bien graduadas, a excepción de las granulometrías V-12 y SCT EE < 1 millón, las cuales coincidentemente son granulometrías utilizadas para mezclas asfálticas para tránsito liviano. La banda tradicional II-12 es la única que se encuentra entre las gravas y arenas bien graduadas, siendo además la que presenta la relación Grava/Arena más alta del conjunto de granulometrías para tamaño máximo 19 [mm]. El resto de las bandas analizadas tienen un valor de la razón Grava/Arena en las cercanías de 50:50. Los puntos de control de la metodología SUPERPAVE se encuentran justo en el límite inferior de arenas bien graduadas.

La mezcla asfáltica constituida por la granulometría 4, no cumple con los requerimientos tradicionales de vacíos de aire, para conformar ninguno de los tipos de capas asfálticas (Rodadura, intermedia, base gruesa y superficie fina) expuestos en el Manual de Carreteras de Chile. Estos vacíos de aire superan el 10% y un aumento en el contenido de asfalto para disminuir este valor, generaría una disminución en la estabilidad al punto de no cumplir con los valores mínimos. Se concluye de este modo que los puntos de control SUPERPAVE entregan una amplitud de elección de granulometrías no adecuadas para ser usadas bajo los estándares tradicionales debido a se pueden generar como en este caso granulometrías discontinuas, las cuales generan un empaquetamiento débil y poroso en la mezcla asfáltica.

De la dosificación realizada a la mezcla asfáltica con granulometría 1 (máxima densidad), se verificó la recomendación de la metodología SUPERPAVE acerca de la insuficiencia de vacíos generados por esta configuración de agregados, debido a que los vacíos en el agregado mineral son menores al 14% que especifica el Manual de Carreteras, siendo además imposible aumentar el contenido de asfalto para cumplir con esta recomendación, ya que al hacerlo se disminuyen los vacíos de aire en la mezcla, alejándose rápidamente del rango permitido. Por el contrario al análisis de vacíos, la granulometría 1 logra generar las mezclas asfálticas con mayor densidad, mayor resistencia (estabilidad) y mayor influencia de la compactación en sus propiedades.

Se confirmó que todas las propiedades analizadas a las mezclas, y para todas las granulometrías, son influenciadas directamente por el nivel de compactación y que además tienen una tendencia común. Debido a esto, y los valores obtenidos, niveles altos de compactación como los obtenidos por el tráfico a lo largo de la vida útil del camino, podrían provocar descensos significativos en las propiedades volumétricas como los vacíos de aire y los vacíos en el agregado mineral.

A partir de los datos experimentales de dosificación realizados a la granulometría 3 (la cual sólo cumplía los parámetros del método Bailey), se encontraron deficiencias en la cantidad máxima de vacíos para una carpeta de rodadura ($V_a=7,8\%$ para el contenido de asfalto óptimo), lo que advierte que dichos parámetros de ser utilizados sin las verificaciones empíricas correspondientes, pueden generar mezclas muy porosas. Sin embargo, los parámetros Bailey de la mezcla G3, en los límites de los rangos permitidos por la metodología ($CA=0,73, FA_c=0,35, FA_f=0,4$), lo que sugiere ampliar los análisis experimentales a un mayor número de granulometrías con distintos valores de estos parámetros Bailey, para que estos sean adaptados a los requerimientos tradicionales de las propiedades de las mezclas para distintos tipos de carpetas.

Del conjunto de datos obtenidos, tanto para probetas con variación en el nivel de compactación, como para la dosificación con distintos contenidos de asfalto, se puede concluir que sólo la mezcla G1 cumple con el requerimiento de dosificación SUPERPAVE (primer nivel de dosificación volumétrica) mínimo de 65% para los vacíos llenos con asfalto, lo que hace coincidencia con el hecho de permitir un menor contenido de vacíos de aire de esta normativa (mínimo permitido por SUPERPAVE es 3%, mientras que para mezclas de rodadura la práctica chilena recomienda un mínimo 4% vacíos según la tabla 5.408.203.A del Manual de Carreteras), lo que induce a la utilización de un mayor contenido de asfalto, si se busca el contenido óptimo de asfalto con las especificaciones del nivel 1 de SUPERPAVE.

4.2 Recomendaciones

A pesar que se concluyo la inclusión de los parámetros Bailey como consecuencia del análisis teórico realizado y la documentación estudiada, se recomienda la realización de ensayos de laboratorio como los realizados en esta memoria pero a un mayor número de granulometrías contenidas principalmente en la banda IV-a-12, con el objetivo de validar esta incorporación a través del análisis de los vacíos, estabilidad, contenidos de asfalto óptimo y compactibilidad de cada mezcla asfáltica.

Seria valioso evaluar experimentalmente el comportamiento de mezclas asfálticas con granulometrías que cumplen V-12 y SCT $EE < 1$ millon, pero que están fuera del rango de arenas bien graduadas , ya que de obtener resultados negativos, se podría validar la recomendación de acotar dichas bandas al rango permitido por la metodología RAMCODES.

Debido a las conclusiones experimentales que se obtuvieron de las mezclas asfálticas constituidas por la granulometría de máxima densidad, se recomienda incluir formalmente esta recomendación a la banda granulométrica IV-a-12, siendo además recomendable realizar ensayos de dosificación Marshall a mezclas asfálticas con granulometrías cercanas a la línea de máxima densidad, con el objetivo de identificar el rango de influencia de dicha línea en cada banda granulométrica recomendada por el Manual de Carreteras.

Como consecuencia de la estrecha relación entre las propiedades estudiadas a las mezclas asfálticas y la compactación, se recomienda la comparación experimental entre la compactación generada por el martillo Marshall y el compactador giratorio SUPERPAVE, con el objeto de evaluar las variaciones con respecto a los requerimientos tradicionales, teniendo en consideración que la compactación con compactador giratorio se acerca más a las condiciones reales de construcción.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) DIRECCIÓN DE VIALIDAD, MOP. Manual de Carreteras, Volumen N°5, Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. Santiago, Chile. 2003.
- 2) DIRECCIÓN DE VIALIDAD, MOP. Manual de Carreteras, Volumen N°8, Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control. Santiago, Chile. 2003.
- 3) LABORATORIO NACIONAL DE VIALIDAD, MOP. Curso Laboratorista Vial. 5ª edición, Vol. II:Asfalto. Santiago, Chile, 2000.
- 4) LABORATORIO NACIONAL DE VIALIDAD, MOP. Curso Laboratorista Vial, Vol. III: Geotecnia. Santiago, Chile, 2000.
- 5) THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design. Washington, D.C., Estados Unidos. 2002.
- 6) MODIFIED ASPHALT RESEARCH CENTER, Using the gyratory pressure distribution analyzer to estimate compaction resistance of hot mixture asphalt. Wisconsin, Estados Unidos.
- 7) NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, Aggregate Properties and the Performance of Superpave-Designed Hot Mix Asphalt, Washington, D.C., Estados Unidos. 2005.
- 8) SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE, Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, Querétaro, Mexico. 2006.
- 9) U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Superpave Asphalt Mixture Design, Washington, D.C., Estados Unidos. 2002.
- 10) SÁNCHEZ-LEAL, Freddy J. Gradation Chart for Asphalt Mixes: Development, Venezuela. 2007.
- 11) SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE, Análisis comparativo de los métodos Marshall y SUPERPAVE para compactación de mezclas asfálticas, Querétaro, Mexico. 2005.
- 12) DAVILA M., Juan Manuel. Análisis comparativo de modulo resiliente y ensayos de deformación permanente en mezclas asfálticas del tipo MDC2 en briquetas compactadas con martillo Marshall y compactador giratorio, Bogotá, D.C., Colombia. 2005.
- 13) FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, SUPERPAVE Asphalt Mixture Design Illustrated: Level 1 Lab Methods, Washington, D.C., Estados Unidos. 1995.

- 14) FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, SUPERPAVE Antecedentes de diseño y analisis de mezclas asfálticas de SUPERPAVE, Washington,D.C.,Estados Unidos.
- 15) SAGREDO FLORES, Raúl. Las mezclas asfálticas bajo la visión de los nuevos conceptos SHRP-SUPERPAVE, Santiago, Chile.1998.
- 16) CONTRERAS LOPEZ, Catalina del Pilar. Mapa de recomendación de uso de ligantes asfálticos según clasificación superpave, aplicado al tramo entre Santiago y Los Angeles, Santiago, Chile.2007.
- 17) Pagina Web: <http://training.ce.washington.edu/PGI/>

ANEXO A

PROBETAS CILÍNDRICAS CON VARIACIÓN EN EL NIVEL DE COMPACTACIÓN

Granulometría 1

	Golpes [numero]								
	35			50			75		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso en aire A [g]	1152,6	1150,4	1152,8	1152,0	1155,0	1154,4	1153,5	1155,4	1153,4
Peso en agua C [g]	668,8	669,7	670,3	672,9	678,3	676,6	681,9	683,4	682,7
Peso sat. Sup. Seca B [g]	1153,8	1152,0	1153,8	1153,6	1155,7	1155,2	1154,4	1156,6	1154,4
Densidad G [Kg/m3]	2376,5	2385,2	2384,3	2396,5	2419,4	2412,0	2441,3	2441,7	2445,2
Densidad media G [Kg/m3]	2382			2409			2443		
Estabilidad	320	300	322	363	362	301	378	388	405
Espesor promedio [mm]	61,5	60,9	60,8	60,5	60,2	60,3	60	60,4	59,8
Factor de correccion fc	1,056	1,074	1,078	1,087	1,096	1,093	1,103	1,09	1,109
Estabilidad corregida [N]	11067	10555	11367	12915	12986	10777	13645	13839	14695
Estabilidad Promedio [N]	10996			12226			14060		
Fluencia [0,01"]	12	13	15	17	15	14	15	17	16
Fluencia [mm]	3	3,25	3,75	4,25	3,75	3,5	3,75	4,25	4
Fluencia Promedio[mm]	3,3			3,8			4,0		
Contenido de asfalto [%]	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
VAM [%]	15,1	14,7	14,8	14,3	13,5	13,8	12,7	12,7	12,6
VAM promedio[%]	14,9			13,9			12,7		
Va [%]	5,48	5,13	5,17	4,68	3,77	4,06	2,90	2,88	2,74
Va promedio[%]	5,3			4,2			2,8		
VLL [%]	63,6	65,2	65,1	67,4	72,1	70,5	77,2	77,3	78,2
VLL promedio[%]	64,6			70,0			77,6		

Granulometría 2

	Golpes [numero]								
	35			50			75		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso en aire A [g]	1153,7	1146,8	1151,5	1154,4	1138,8	1157,5	1154,2	1150,9	1150,7
Peso en agua C [g]	651,2	651,4	649,8	661,0	649,4	662,5	663,0	659,1	660,1
Peso sat. Sup. Seca B [g]	1160,7	1149,1	1155,7	1158,7	1140,8	1160,5	1156,1	1152,9	1152,1
Densidad G [Kg/m3]	2264,4	2304,2	2276,1	2319,5	2317,5	2324,3	2340,7	2330,7	2338,8
Densidad media G [Kg/m3]	2282			2320			2337		
Estabilidad	235	373	343	379	385	315	374	372	360
Espesor promedio [mm]	63,8	62,2	63,3	61,2	61,3	62,2	61,3	61,4	61,2
Factor de corrección fc	0,993	1,035	1,005	1,065	1,062	1,035	1,062	1,059	1,065
Estabilidad corregida [N]	7655	12635	11286	13209	13380	10678	12999	12893	12550
Estabilidad Promedio [N]	10525			12422			12814		
Fluencia [0,01"]	11	11	11	12	12	12	12	12	12
Fluencia [mm]	2,75	2,75	2,75	3	3	3	3	3	3
Fluencia Promedio[mm]	2,8			3,0			3,0		
Contenido de asfalto [%]	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
VAM [%]	15,8	14,3	15,4	13,8	13,8	13,6	13,0	13,3	13,0
VAM promedio[%]	15,2			13,7			13,1		
Va [%]	9,49	7,90	9,02	7,29	7,37	7,10	6,44	6,84	6,52
Va promedio[%]	8,8			7,3			6,6		
VLL [%]	40,0	44,9	41,3	47,0	46,7	47,8	50,4	48,7	50,0
VLL promedio[%]	42,1			47,2			49,7		

Granulometría 3

	Golpes [numero]								
	35			50			75		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso en aire A [g]	1125,7	1141,3	1133,2	1141,7	1120,7	1130,1	1138,4	1143,2	1139,4
Peso en agua C [g]	654,1	664,6	656,8	662,7	653,8	656,3	659,8	665,5	664,2
Peso sat. Sup. Seca B [g]	1145,1	1162,4	1153,9	1160,5	1142,2	1149,3	1153,7	1160,3	1157,8
Densidad G [Kg/m ³]	2292,7	2292,7	2279,6	2293,5	2294,6	2292,3	2304,9	2310,4	2308,3
Densidad media G [Kg/m ³]	2288			2293			2308		
Estabilidad	297	306	276	325	290	313	346	342	320
Espesor promedio [mm]	65,7	66,6	66,8	65,8	66,2	65,7	65,4	65,6	65,9
Factor de corrección fc	0,949	0,932	0,928	0,947	0,939	0,949	0,954	0,951	0,945
Estabilidad corregida [N]	9234	9342	8394	10079	8922	9729	10806	10648	9903
Estabilidad Promedio [N]	8990			9576			10453		
Fluencia [0,01"]	12	14	13	15	14	15	15	16	14
Fluencia [mm]	3	3,5	3,25	3,75	3,5	3,75	3,75	4	3,5
Fluencia Promedio[mm]	3,3			3,7			3,8		
Contenido de asfalto [%]	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
VAM [%]	19,3	19,3	19,8	19,3	19,3	19,4	18,9	18,7	18,8
VAM promedio[%]	19,5			19,3			18,8		
Va [%]	8,45	8,45	8,97	8,42	8,38	8,47	7,96	7,74	7,83
Va promedio[%]	8,6			8,4			7,8		
VLL [%]	56,3	56,3	54,7	56,4	56,6	56,3	57,9	58,6	58,4
VLL promedio[%]	55,8			56,4			58,3		
Observaciones: La mezcla mostro un exceso de asfalto, notándose en la facilidad de mezclado, dificultad en la compactación (segregación) y exudación de las probetas									

Granulometría 4

	Golpes [numero]								
	35			50			75		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso en aire A [g]	1153,2	1145,7	1151,5	1152,2	1154,9	1152,4	1150,1	1149,4	1150,9
Peso en agua C [g]	656,6	651,6	656,8	655,2	655,5	656,5	655,6	657,2	655,9
Peso sat. Sup. Seca B [g]	1178,2	1170,9	1177,2	1175,2	1177,6	1177,2	1172,5	1172,8	1171,1
Densidad G [Kg/m ³]	2210,9	2206,2	2212,7	2215,8	2212,0	2213,2	2225,0	2229,2	2233,9
Densidad media G [Kg/m ³]	2210			2214			2229		
Estabilidad	202	212	193	222	225	209	220	224	241
Espesor promedio [mm]	68,4	68,2	68,7	67,7	67,7	68,3	67,5	67,4	67,1
Factor de corrección fc	0,888	0,893	0,883	0,905	0,905	0,89	0,91	0,913	0,92
Estabilidad corregida [N]	5890	6214	5598	6593	6681	6106	6570	6711	7272
Estabilidad Promedio [N]	5901			6460			6851		
Fluencia [0,01"]	10	11	9	11	12	12	12	12	11
Fluencia [mm]	2,5	2,75	2,25	2,75	3	3	3	3	2,75
Fluencia Promedio[mm]	2,5			2,9			2,9		
Contenido de asfalto [%]	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
VAM [%]	20,5	20,6	20,4	20,3	20,4	20,4	19,9	19,8	19,6
VAM promedio[%]	20,5			20,4			19,8		
Va [%]	11,28	11,47	11,20	11,08	11,23	11,19	10,71	10,54	10,36
Va promedio[%]	11,3			11,2			10,5		
VLL [%]	44,9	44,4	45,0	45,3	45,0	45,1	46,3	46,7	47,2
VLL promedio[%]	44,8			45,1			46,8		

Granulometría 5

	Golpes [numero]								
	35			50			75		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso en aire A [g]	1154,0	1149,9	1150,3	1153,3	1154,3	1153,1	1152,8	1152,9	1153,0
Peso en agua C [g]	661,2	658,0	655,9	658,7	661,5	663,2	664,3	665,6	665,8
Peso sat. Sup. Seca B [g]	1163,6	1159,7	1158,6	1160,1	1162,0	1157,3	1157,5	1156,7	1158,2
Densidad G [Kg/m3]	2297,0	2292,0	2288,2	2300,2	2306,3	2333,7	2337,4	2347,6	2341,6
Densidad media G [Kg/m3]	2292			2313			2342		
Estabilidad	245	273	314	265	305	296	302	295	298
Espesor promedio [mm]	63,7	63,5	63,2	63,2	63,2	62,4	62,1	61,8	62,7
Factor de corrección fc	0,995	1	1,008	1,008	1,008	1,029	1,037	1,046	1,021
Estabilidad corregida [N]	7994,53	8947,5	10366,4	8756,19	10070,6	9978,52	10258,9	10109,3	9967,51
Estabilidad Promedio [N]	9103			9602			10112		
Fluencia [0,01"]	12	13	14	14	15	14	12	11	12
Fluencia [mm]	3	3,25	3,5	3,5	3,75	3,5	3	2,75	3
Fluencia Promedio[mm]	3,3			3,6			2,9		
Contenido de asfalto [%]	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
VAM [%]	19,1	19,3	19,4	19,0	18,8	17,8	17,7	17,3	17,5
VAM promedio[%]	19,2			18,5			17,5		
Va [%]	8,38	8,58	8,73	8,25	8,01	6,92	6,77	6,36	6,60
Va promedio[%]	8,6			7,7			6,6		
VLL [%]	56,1	55,5	55,0	56,5	57,3	61,1	61,7	63,2	62,3
VLL promedio[%]	55,5			58,3			62,4		

ANEXO B

DOSIFICACIÓN MARSHALL PARA COMPACTACIÓN DE 75 GOLPES

Granulometría 1

	%CA 24								
	5,0			5,5			6,0		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso en aire A [g]	1148,1	1148,3	1148,8	1153,5	1155,4	1153,4	1156,0	1157,9	1159,2
Peso en agua C [g]	674,4	676,8	681,9	681,9	683,4	682,7	684,5	687,3	687,3
Peso sat. Sup. Seca B [g]	1149,6	1149,7	1149,5	1154,4	1156,6	1154,4	1156,5	1158,4	1159,8
Densidad G [Kg/m3]	2416,0	2428,2	2456,8	2441,3	2441,7	2445,2	2449,2	2457,9	2453,3
Densidad media G [Kg/m3]	2434			2443			2453		
Estabilidad	354	424	374	378	388	405	357	378	395
Espesor promedio [mm]	59,7	59,4	58,8	60	60,4	59,8	59	58,9	59,2
Factor de corrección fc	1,112	1,121	1,14	1,103	1,09	1,109	1,134	1,137	1,128
Estabilidad corregida [N]	12886	15548	13954	13645	13839	14695	13252	14065	14579
Estabilidad Promedio [N]	14129			14060			13965		
Fluencia [0,01"]	15	16	15	15	17	16	16	17	17
Fluencia [mm]	3,75	4	3,75	3,75	4,25	4	4	4,25	4,25
Fluencia Promedio[mm]	3,8			4,0			4,2		
Contenido de asfalto [%]	5,0	5,0	5,0	5,5	5,5	5,5	6,0	6,0	6,0
VAM [%]	13,2	12,8	11,8	12,7	12,7	12,6	12,9	12,6	12,7
VAM promedio[%]	12,6			12,7			12,7		
Va [%]	4,56	4,08	2,95	2,90	2,88	2,74	1,93	1,58	1,76
Va promedio[%]	3,9			2,8			1,8		
VLL [%]	65,6	68,2	75,0	77,2	77,3	78,2	85,0	87,4	86,2
VLL promedio[%]	69,6			77,6			86,2		

Granulometría 3

	%CA 24								
	5,0			5,5			6,0		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso en aire A [g]	1140,9	1140,8	1136,5	1138,4	1143,2	1139,4	1139,7	1143,5	1146,5
Peso en agua C [g]	667,1	664,1	663,3	659,8	665,5	664,2	659,3	659,3	658,9
Peso sat. Seca B [g]	1160,0	1155,3	1152,4	1153,7	1160,3	1157,8	1155,3	1155,1	1157,1
Densidad G [Kg/m ³]	2314,7	2322,5	2323,7	2304,9	2310,4	2308,3	2297,8	2306,4	2301,3
Densidad media G [Kg/m ³]	2320			2308			2302		
Estabilidad	180	219	243	346	342	320	210	209	225
Espesor promedio [mm]	65,7	64,7	64,5	65,4	65,6	65,9	65,3	64,6	64,8
Factor de corrección fc	0,949	0,97	0,975	0,954	0,951	0,945	0,956	0,973	0,968
Estabilidad corregida [N]	5614	6971	7770	10806	10648	9903	6590	6676	7146
Estabilidad Promedio [N]	6785			10453			6804		
Fluencia [0,01"]	10	10	10	15	14	15	11	11	11
Fluencia [mm]	2,5	2,5	2,5	3,75	3,5	3,75	2,75	2,75	2,75
Fluencia Promedio[mm]	2,5			3,7			2,8		
Contenido de asfalto [%]	5,0	5,0	5,0	5,5	5,5	5,5	6,0	6,0	6,0
VAM [%]	16,9	16,6	16,6	17,6	17,4	17,5	18,3	18,0	18,1
VAM promedio[%]	16,7			17,5			18,1		
Va [%]	8,20	7,89	7,84	7,96	7,74	7,83	7,64	7,29	7,49
Va promedio[%]	8,0			7,8			7,5		
VLL [%]	51,4	52,5	52,6	54,8	55,5	55,3	58,2	59,4	58,7
VLL promedio[%]	52,2			55,2			58,8		

Granulometría 4

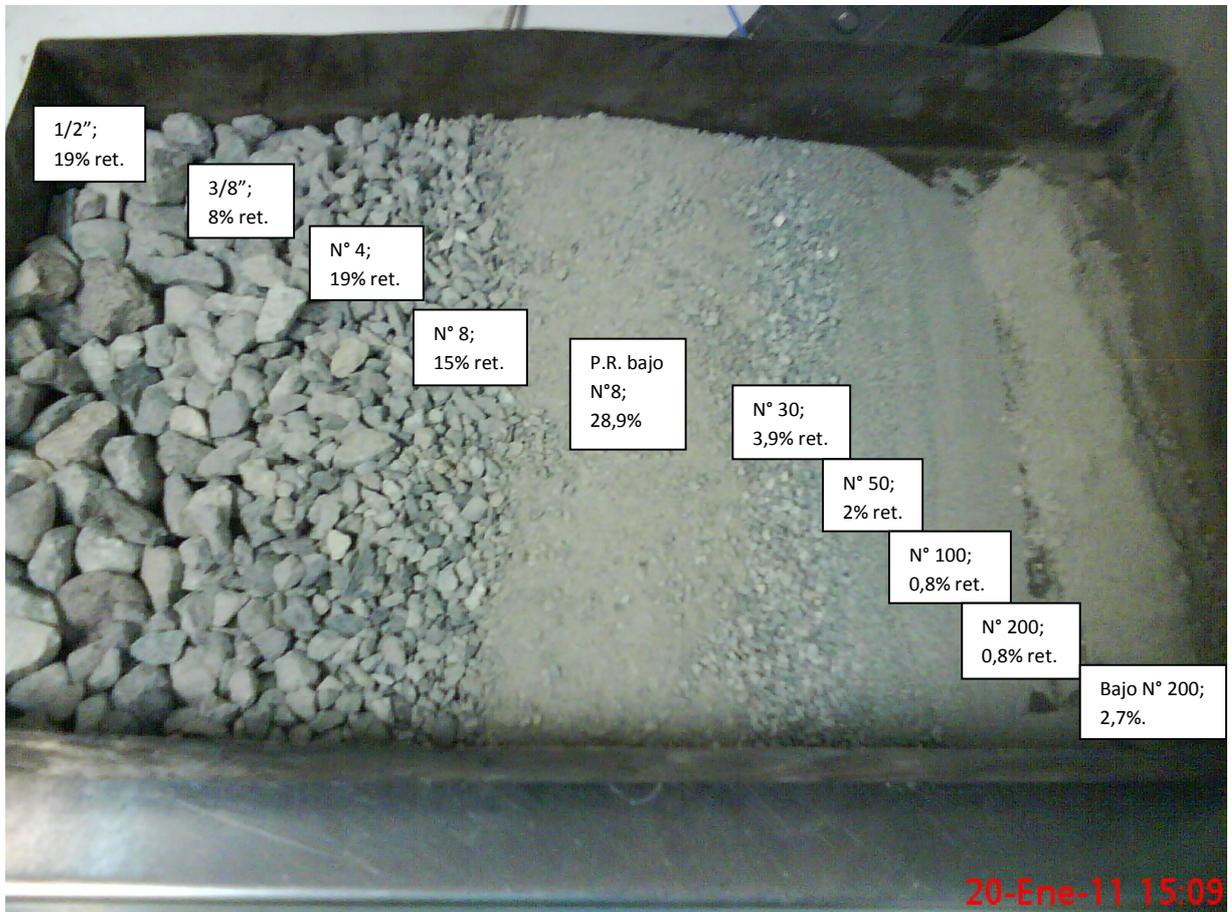
	%CA 24								
	5,0			5,5			6,0		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso en aire A [g]	1142,0	1141,5	1145,4	1150,1	1149,4	1150,9	1150,4	1155,9	1152,9
Peso en agua C [g]	657,7	654,0	657,7	655,6	657,2	655,9	656,0	655,7	652,5
Peso sat. Sup. Seca B [g]	1167,3	1166,0	1170,3	1172,5	1172,8	1171,1	1172,3	1175,2	1170,0
Densidad G [Kg/m3]	2241,0	2229,5	2234,5	2225,0	2229,2	2233,9	2228,2	2225,0	2227,8
Densidad media G [Kg/m3]	2235			2229			2227		
Estabilidad	244	226	238	220	224	241	211	224	228
Espesor promedio [mm]	67,2	67,9	67,4	67,5	67,4	67,1	67,6	67,4	66,9
Factor de corrección fc	0,918	0,9	0,913	0,91	0,913	0,92	0,908	0,913	0,925
Estabilidad corregida [N]	7345,93	6673,77	7127,33	6569,93	6710,64	7271,96	6289,08	6710,64	6919,46
Estabilidad Promedio [N]	7049			6851			6640		
Fluencia [0,01"]	10	10	10	12	12	11	9	10	10
Fluencia [mm]	2,5	2,5	2,5	3	3	2,75	2,25	2,5	2,5
Fluencia Promedio[mm]	2,5			2,9			2,4		
Contenido de asfalto [%]	5,0	5,0	5,0	5,5	5,5	5,5	6,0	6,0	6,0
VAM [%]	19,5	19,9	19,8	20,5	20,3	20,2	20,7	20,8	20,8
VAM promedio[%]	19,7			20,3			20,8		
Va [%]	10,67	11,13	10,93	10,71	10,54	10,36	9,99	10,12	10,01
Va promedio[%]	10,9			10,5			10,0		
VLL [%]	45,3	44,2	44,7	47,7	48,1	48,6	51,8	51,5	51,8
VLL promedio[%]	44,7			48,1			51,7		

Ensayo de máxima densidad para la mezcla no compactada

	G1	G2	G3	G4	G5
Mása muestra seca [g]	2317,5	2309,9	2302,2	2312	2311,5
Mása recipiente lleno con agua más muestra [g]	8771,5	8762,4	8758,7	8760	8765,3
Mása recipiente con agua a 25 [°C], [g]	7373,1	7373,1	7373,1	7373,1	7373,1
Densidad agua a 25°C [Kg/m3]	997,1	997,1	997,1	997,1	997,1
Densidad máxima de la muestra [Kg/m3]	2514,2	2501,8	2504,4	2491,9	2507,1

ANEXO C
FOTOGRAFIAS

Distribución de áridos para la granulometría 1

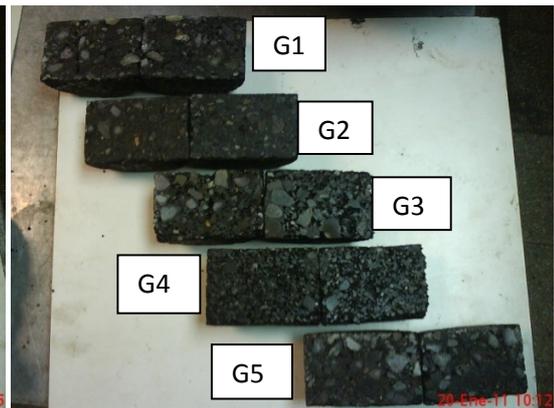


Fotografías probetas (75, 50 y 35 golpes de compactación)





Corte de las probetas



Mezcla realizada con granulometría 1



Mezcla realizada con granulometría 2



Mezcla realizada con granulometría 3



Mezcla realizada con granulometría 4



Mezcla realizada con granulometría 5

