

no more
67888

T
W7752
2015



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



"Análisis comparativo de pavimento del diseño de
mezcla asfáltica mediante el método Superpave y el
método Marshall en ruta F-62".

Por

Felipe Patricio Winkler Toledo

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

Prof. Guía Guillermo Brante Lara

Septiembre, 2015

R. 18424

METODO Marshall
Geometría
Asfalto
METODO Superpave

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todos los que hicieron posibles la realización de este trabajo de título. A mi profesor guía Guillermo Brante Lara, al Laboratorio Nacional de Vialidad y al laboratorio de Vialidad de la región de Valparaíso.

Quisiera agradecer también el apoyo incondicional de mi familia durante estos años de estudio.

Índice



Glosario	5
Lista de abreviaturas o siglas	6
Lista de símbolos	7
Lista de tablas	10
Lista de figuras	12
Lista de ecuaciones	13
Resumen	14
1 Introducción	15
1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo General	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
1.3 Alcances	17
1.4 Metodología de trabajo	17
2 Método Marshall	20
2.1 Procedimiento del método Marshall	20
2.2 Características de los materiales	20
2.2.1 Ligante asfáltico	20
2.2.2 Agregados pétreos	21
2.2.2.1 Gravilla 11/17	22
2.2.2.2 Gravilla 5/11	26
2.2.2.3 Polvo roca 0/5	27
2.3 Característica para la mezcla	29
2.3.1 Granulometría	29
2.3.2 Constantes físicas e hídricas	31
2.3.3 Dosificación de áridos en peso	31
2.3.4 Característica de la mezcla de agregados	31
2.4 Visación Marshall	35
2.4.1 Ligante asfáltico	35
2.4.2 Reconstitución Marshall	35
2.4.3 Confección de probetas	35
2.4.3.1 Preparación de muestras	35
2.4.3.2 Compactación de probetas	37

2.4.3.3	Desmoldar probeta confeccionada	38
2.5	Porcentaje de asfalto óptimo.....	39
2.5.1	Parámetros Marshall.....	39
2.5.2	Determinación de la absorción de agua y densidad de las probetas	39
2.5.2.1	Peso seco	39
2.5.2.2	Peso bajo agua	39
2.5.2.3	Peso superficialmente seco.....	40
2.5.2.4	Absorción de agua	40
2.5.2.5	Densidad de cada probeta.....	40
2.5.2.6	Resumen de densidades y absorciones.....	41
2.5.3	Determinación de fluidez y estabilidad de las probetas	42
2.5.3.1	Determinación de las alturas de las probetas [9].....	42
2.5.3.2	Procedimiento	43
2.5.3.3	Cálculo de la fluidez	43
2.5.3.4	Cálculo de la estabilidad.....	44
2.5.4	Densidad máxima de la mezcla.....	45
2.5.5	Volumen de vacíos de aire en la mezcla.....	45
2.5.6	Volumen de vacíos en el agregado mineral	46
2.5.7	Volumen de vacíos llenados con asfalto.....	46
2.5.8	Resumen de parámetros Marshall.....	47
2.5.9	Asfalto óptimo.....	47
2.6	Gráficos de diseño Marshall.....	48
2.7	Mezcla de trabajo	51
2.8	Resumen del capítulo	52
3	Método Superpave.....	53
3.1	Procedimiento del método Superpave.....	53
3.2	Niveles de diseño	54
3.3	Análisis granulométrico con estándares Superpave	54
3.4	Estructura del agregado de diseño.....	56
3.5	Ligante asfáltico de prueba.....	58
3.5.1	Gravedad específica bruta, aparente y efectiva de los agregados.....	58
3.5.1.1	Gravedad específica aparente de la mezcla de los agregados.....	59
3.5.1.2	Gravedad específica bruta de la mezcla de los agregados.....	60
3.5.1.3	Gravedad específica efectiva de los agregados.....	60
3.5.2	Volumen de ligante absorbido y efectivo.....	60

3.5.2.1	Volumen de ligante absorbido	60
3.5.2.2	Volumen de ligante efectivo.....	61
3.5.3	Peso del agregado	61
3.5.4	Porcentaje de ligante asfáltico de prueba	61
3.6	Compactador giratorio	62
3.6.1	Reconstitución Superpave.....	62
3.6.2	Procedimiento de la compactación [13]	63
3.6.2.1	Preparación de la mezcla	63
3.6.2.2	Preparación compactador giratorio	63
3.6.2.3	Compactación de la mezcla.....	64
3.6.3	Datos obtenidos por el compactador giratorio.....	66
3.7	Aplicación de resultados para obtener volúmenes reales	66
3.7.1	Gmm teórico según el porcentaje asfalto de prueba	66
3.7.2	Gmb según el porcentaje asfalto de prueba.....	66
3.7.2.1	Densidad de la mezcla	67
3.7.2.2	Gravedad específica de la mezcla compactada a número de giros de diseño	67
3.7.3	Cálculo de Va y VAM al porcentaje de asfalto de prueba.....	68
3.8	Asfalto óptimo estimado.....	69
3.8.1	Asfalto óptimo estimado	69
3.8.2	Volumen de vacíos en el agregado mineral estimado	69
3.8.3	VFA estimado	70
3.8.4	Porcentaje de gravedad específica máxima a giro inicial estimado	70
3.8.5	Porcentaje de gravedad específica máxima a giro de diseño estimado.....	71
3.8.6	Asfalto efectivo estimado.....	71
3.8.7	Porción de polvo estimado	72
3.8.8	Resumen de valores estimados	72
3.9	Selección del porcentaje de ligante asfalto óptimo de diseño	74
3.9.1	Reconstitución Superpave.....	74
3.9.2	Procedimiento de compactación.....	74
3.9.3	Densidades.....	75
3.9.4	Porcentaje de la gravedad específica máxima de la mezcla compactada.....	75
3.9.5	Cálculo de %Gmm para cada giro	76
3.9.5.1	Ligante asfáltico 4,7%	76
3.9.5.2	Ligante asfáltico 5,2%	76
3.9.5.3	Ligante asfáltico 5,7%	77

3.9.5.4	Ligante asfáltico 6,2%	77
3.9.6	Resumen de datos	78
3.9.6.1	Parámetros de compactación	78
3.9.6.2	Parámetros volumétricos	79
3.10	Asfalto óptimo de diseño	81
4	Análisis de resultados	82
4.1	Comparación del proceso	82
4.2	Comparación de resultados	83
4.2.1	Comparación de las mezclas de diseño	84
4.2.2	Comparación para los distintos contenidos de asfalto	85
4.2.3	Comparación gráfica	86
5	Conclusión	89
6	Bibliografía	91
7	Anexos	92
8	Apéndice	128

Glosario

Granulometría: Distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido.

Agregado: está referido al agregado mineral que compone la mezcla asfáltica

Tamaño máximo absoluto: Corresponde a la abertura del menor tamiz de la serie establecida, que deja pasar el 100% de la masa del árido.

Tamaño máximo nominal: Corresponde a la abertura del tamiz inmediatamente menor que el tamaño máximo absoluto, cuando por dicho tamiz pase el 90% o más de la masa de un árido. Al pasar menos del 90%, el tamaño máximo nominal se considerará igual al tamaño máximo absoluto.

Partículas lajeadas: Son piedras planas, lisas y poco gruesas.

Partículas chancadas: Son piedras trituradas, que en conjunto generan una mayor trabazón.

Partículas rodadas: Son fragmentos de roca pulidos y sueltos, susceptibles de ser transportados por medios naturales.

Los volúmenes de vacíos en agregado mineral (VAM): Son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

Los volúmenes de vacíos llenados con asfalto (VFA): Son los porcentajes de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VAM) que se encuentran llenos de asfalto. El VAM abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA se calcula al restar los vacíos de aire de VAM, y luego dividiendo por el VAM, y expresando el valor final como un porcentaje.

Los volúmenes de vacíos de aire (Va): Son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada.

Gravedad específica efectiva (Gse): Proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material permeable (excluyendo vacíos permeables de asfalto) a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada

Lista de abreviaturas o siglas

AASHTO: American Association of State Highways Officials.

ASTM: American Society for Testing Materials.

SHRP: Strategic Highway Research Program

Superpave: Superior Performing Asphalt Pavement

ESALs: equivalent single axle load

Lista de símbolos

Gmm:	gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica
Gmb:	gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada
ρ_{RS} :	Densidad real seca del agregado
ρ_N :	Densidad neta del agregado
α :	Absorción del agregado
ρ_{as} :	Densidad aparente
V:	Volumen
Mp:	Masa promedio
Ms:	Masa suelta
A_{ab} :	Absorción de la mezcla
D_{mm} :	Densidad máxima de la mezcla
ρ_E :	Densidad efectiva del agregado
ρ_b :	Densidad del asfalto
Pb:	Porcentaje del ligante asfáltico
ρ_w :	Densidad del agua
Va:	Volumen de vacíos de aire en la mezcla
G:	Densidad de la mezcla compactada
VAM.:	Volumen de vacíos en el agregado mineral
VFA.:	Volumen de vacíos llenados con asfalto
$Pb_{estabilidad}$:	Porcentaje de asfalto el cual pertenece al mayor valor de estabilidad
$Pb_{densidad}$:	Porcentaje de asfalto el cual pertenece al mayor valor de densidad
$Pb_{5\% \text{ huecos}}$:	Porcentaje de asfalto el cual pertenece al 5% de vacíos de aire
Pb óptimo:	Porcentaje de asfalto óptimo
Ge:	Gravedad específica
P.E.:	Peso específico del material

$P_{E_{agua}}$: Peso específico del agua

ρ : Densidad

g : gravedad

G_{sa} : Gravedad específica aparente de la mezcla

$G_{sa_{grav\ 19}}$: Gravedad específica aparente gravilla 19mm

$G_{sa_{grav\ 12,5}}$: Gravedad específica aparente gravilla 12,5mm

$G_{sa_{p,r.}}$: Gravedad específica aparente polvo roca

$\%Mezcla_{grav\ 19}$: Dosificación gravilla 19mm

$\%Mezcla_{grav\ 12,5}$: Dosificación gravilla 12,5mm

$\%Mezcla_{p,r.}$: Dosificación polvo roca

G_{sb} : Gravedad específica bruta de la mezcla

$G_{sb_{grav\ 19}}$: Gravedad específica bruta gravilla 19mm

$G_{sb_{grav\ 12,5}}$: Gravedad específica bruta gravilla 12,5mm

G_{se} : Gravedad específica efectiva de los agregados

V_{ba} : Volumen del ligante absorbido

Ps : Porcentaje del agregado

G_b : Gravedad específica del ligante

V_{be} : Volumen del ligante efectivo

Ws : Peso del agregado

P_{bi} : Ligante asfáltico de prueba

$P_{b\ estimado}$: Ligante asfáltico óptimo estimado

N_{ini} : Número de giros iniciales

N_{dis} : Número de giros de diseño

$N_{max.}$: Número de giros máximos

H_{160} : Altura de la probeta a 160 giros

H_{100} : Altura de la probeta a 100 giros

$G_{mb_{160}}$: Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada a 160 giros

Gmb_{100} : Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada a 100 giros

P: Peso

R: Radio

H: Altura

Gmm: Gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica

F.C.: Factor de corrección (Es incluido solo cuando hay valores del compactador giratorio)

Pb_{est} : Asfalto óptimo estimado

Va_i : Volumen de vacíos de aire de prueba

PSS: Peso superficialmente seco

Lista de tablas

Tabla 1.1- Proceso del diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall.....	18
Tabla 1.2- Proceso del diseño de mezclas asfálticas por el método Superpave.....	19
Tabla 2.1- Especificaciones de cemento asfáltico según grado de viscosidad [2].....	21
Tabla 2.2- Masa mínima para realizar granulometría [3].....	22
Tabla 2.3- Porcentaje que pasa por el tamizado.....	23
Tabla 2.4- Masa mínima para realizar ensayos de densidades y absorción [4].....	23
Tabla 2.5- Densidad aparente suelta.....	25
Tabla 2.6- Cubicidad de las partículas [5].....	25
Tabla 2.7- Pesos chancados y rodados.....	25
Tabla 2.8- Porcentajes de chancado, rodado y lajas.....	26
Tabla 2.9- Porcentaje que pasa gravilla 5/11.....	26
Tabla 2.10- Densidades, partículas chancadas y lajeadas para gravilla 5/11.....	26
Tabla 2.11- Porcentaje que pasa polvo roca.....	27
Tabla 2.12- Densidades, partículas chancadas y lajeadas para polvo roca.....	27
Tabla 2.13- Densidades y absorción de pétreos finos.....	28
Tabla 2.14- Densidad del integral.....	28
Tabla 2.15- Granulometría propia y empresa proveedora.....	29
Tabla 2.16- Constantes físicas e hídricas.....	31
Tabla 2.17- Peso por material.....	32
Tabla 2.18- Peso de cada tamiz por cada material.....	32
Tabla 2.19- Resumen de peso de cada tamiz por material.....	32
Tabla 2.20- Porcentaje de material que pasa por cada tamiz.....	33
Tabla 2.21- Parámetros granulométricos empresa proveedora.....	34
Tabla 2.22- Confección de probetas.....	36
Tabla 2.23- Densidades y absorciones de la mezcla.....	41
Tabla 2.24- Determinación de las alturas de las probetas.....	42
Tabla 2.25- Estabilidad y fluencia.....	44
Tabla 2.26- Parámetros Marshall.....	47
Tabla 2.27- Parámetros relevantes para determinación asfalto óptimo.....	47
Tabla 2.28- Mezcla de trabajo.....	51
Tabla 2.29- Densidad, asfalto y temperatura a utilizar en obra.....	51
Tabla 2.30- Estructura del agregado.....	52
Tabla 2.31- Parámetros Marshall.....	52
Tabla 3.1- Nivel de diseño.....	54
Tabla 3.2- Graduaciones para mezcla Superpave.....	54
Tabla 3.3- Especificaciones de la gráfica Fuller para un tamaño máximo nominal de 12,5mm.....	56
Tabla 3.4- Granulometría.....	56
Tabla 3.5- Mezcla de agregado con sus puntos de control.....	57
Tabla 3.6- Gravedad específica de los agregados.....	59
Tabla 3.7- tipo de acondicionamiento de la mezcla asfáltica [15].....	63
Tabla 3.8- Número de giros a considerar [14].....	64
Tabla 3.9- Datos relevantes obtenidos por el compactador giratorio.....	66
Tabla 3.10- Densidad y absorción para un 4,7% de asfalto.....	67
Tabla 3.11- Datos estimados al 4% de vacíos de aire.....	72

Tabla 3.12- Mínimo %VAM.....	72
Tabla 3.13- Parámetros del %VFA.....	73
Tabla 3.14- Densidad relativa requerida.....	73
Tabla 3.15- Parámetros de porción de polvo.....	73
Tabla 3.16- Densidades a distintos porcentajes de asfalto.....	75
Tabla 3.17- %Gmm para los giros 8, 100 y 160 con un 4,7% de asfalto.....	76
Tabla 3.18- %Gmm para los giros 8, 100 y 160 con un 5,2% de asfalto.....	77
Tabla 3.19- %Gmm para los giros 8, 100 y 160 con un 5,7% de asfalto.....	77
Tabla 3.20- %Gmm para los giros 8, 100 y 160 con un 6,2% de asfalto.....	77
Tabla 3.21- Propiedades de compactación.....	78
Tabla 3.22- Propiedades volumétricas.....	79
Tabla 3.23- Propiedades de la mezcla con 5,2% de asfalto.....	81
Tabla 3.24- Propiedades de compactación.....	81
Tabla 4.1- Resumen de la comparación entre los métodos Marshall y Superpave.....	83
Tabla 4.2- Comparación de resultados.....	84
Tabla 4.3- Parámetros por contenido de asfalto.....	85



Lista de figuras

Figura 2.1- Ligante asfáltico.....	21
Figura 2.2- Gravilla.....	22
Figura 2.3- Tamices.....	33
Figura 2.4- Proceso de mezclado.....	36
Figura 2.5- Compactador Marshall y sus partes.....	37
Figura 2.6- Probetas compactadas.....	38
Figura 2.7- Desmoldar probeta.....	38
Figura 2.8- Probeta sumergida.....	39
Figura 2.9- Máquina estabilidad Marshall y sus partes.....	43
Figura 3.1- Límites para las granulometrías Superpave con un tamaño máximo de 19mm.....	55
Figura 3.2- Probetas para la estructura del agregado.....	57
Figura 3.3- Compactador giratorio y sus componentes.....	62
Figura 3.6- Constantes compactador giratorio.....	64
Figura 3.7- Porcentaje de asfalto de diseño.....	74
Figura 4.1- Probetas de mezclas asfálticas.....	82

Lista de ecuaciones

Ecuación 2.1- Densidad real seca	24
Ecuación 2.2- Densidad neta	24
Ecuación 2.3- Absorción	24
Ecuación 2.4- Masa de la muestra suelta	25
Ecuación 2.5- Densidad aparente suelta	25
Ecuación 2.6- Densidad real seca de pétreos finos	28
Ecuación 2.7- Densidad neta de pétreos finos	28
Ecuación 2.8- Absorción de pétreos finos	28
Ecuación 2.9- Absorción de agua de la probeta asfáltica	40
Ecuación 2.10- Densidad de la probeta asfáltica	40
Ecuación 2.11- Densidad máxima de la mezcla	45
Ecuación 2.12- Volumen de vacíos de aire en la mezcla	45
Ecuación 2.13- Volumen de vacíos en el agregado mineral	46
Ecuación 2.14- Volumen de vacíos llenados con asfalto	46
Ecuación 2.15- Ligante asfáltico óptimo	47
Ecuación 3.1- Gravedad específica	58
Ecuación 3.2- Peso específico	59
Ecuación 3.3- gravedad específica aparente de la mezcla de los agregados	59
Ecuación 3.4- Gravedad específica bruta de la mezcla de los agregados	60
Ecuación 3.5- Gravedad específica de los agregados	60
Ecuación 3.6- Volumen de ligante absorbido	60
Ecuación 3.7- Volumen de ligante efectivo	61
Ecuación 3.8- Peso del agregado	61
Ecuación 3.9- Ligante asfáltico de prueba	61
Ecuación 3.10- Gravedad específica de la mezcla compactada	67
Ecuación 3.11- Volumen de vacíos real al porcentaje de asfalto de prueba	68
Ecuación 3.12- Volumen de vacíos en el agregado mineral al porcentaje de asfalto de prueba	69
Ecuación 3.13- Asfalto óptimo estimado	69
Ecuación 3.14- Volumen de vacíos en el agregado mineral estimado	69
Ecuación 3.15- Volumen de vacíos llenados con asfalto estimado	70
Ecuación 3.16- porcentaje de gravedad específica máxima a giro inicial estimado	70
Ecuación 3.17- porcentaje de gravedad específica máxima a giro de diseño estimado	71
Ecuación 3.18- Asfalto efectivo estimado	71
Ecuación 3.19- Porción de polvo estimado	72
Ecuación 3.20- porcentaje de gravedad específica máxima compactada a n número de giros	76
Ecuación 3.21- Volúmenes de vacíos llenados con asfalto	79

Resumen

Este trabajo de título presenta y analiza dos métodos distintos de diseño de mezcla asfáltica en caliente, el método Marshall y Superpave. El primero es el más utilizado en Chile y el segundo fue desarrollado por el programa SHRP (Strategic Highway Research Program) del departamento de transporte de EEUU. Estos se compararon replicando una dosificación, basada en el método Marshall, realizada por la empresa proveedora de la mezcla asfáltica contratada para la ruta F-62, con la dosificación que se realiza en el método Superpave, revisando y analizando entre ambos diseños.

El diseño de mezclas asfálticas que se utiliza actualmente (método Marshall) se basa en la importancia de lograr propiedades volumétricas adecuadas en la carpeta asfáltica terminada, ya que de esto depende en gran medida el desempeño de la superficie de rodamiento en su vida de servicio. En el método Superpave, para el diseño de mezclas se considera el tránsito vehicular determinando así parámetros volumétricos más adecuados a las condiciones reales. La trascendencia de simular de manera adecuada en el laboratorio la densificación que ocurre en terreno, bajo la acción vehicular podría permitir dosificar mezclas con un mejor comportamiento en condiciones específicas de tránsito.

En relación a la evaluación de las características volumétricas de la mezcla asfáltica, estas se analizaron de manera distinta para los métodos Marshall y Superpave. En ambos casos se emplearon diferentes parámetros como son el porcentaje de vacíos de aire de la mezcla asfáltica compactada (Va), el volumen de vacíos en el agregado mineral (VAM) y los vacíos llenos de asfaltos (VFA), mediante diversas pruebas mecánicas, como son la gravedad específica del agregado mineral (Gsb), la gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada (Gmb) y la gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica (Gmm).

El capítulo 1 corresponde a la introducción del planteamiento del problema, objetivos a analizar, alcances y metodología de esta comparación de métodos de diseño.

El capítulo 2 hace referencia a la metodología de diseño Marshall, se hizo una mención de antecedentes históricos, parámetros de la selección granulométrica de diseño y determinación de parámetros para una óptima elección de diseño de la mezcla asfáltica.

El capítulo 3 describe el diseño por el método Superpave, se hizo mención a una reseña histórica, se realizó la selección granulométrica de diseño corresponde a las limitaciones por medio de la gráfica Fuller y las especificaciones que establece la metodología para determinar el diseño de la mezcla asfáltica.

En el capítulo 4 se analizaron los resultados obtenidos a través del método Marshall y Superpave entre la empresa proveedora y los alcanzados en este trabajo de título.

El capítulo 5 sería la conclusión final de los resultados.

Palabras clave: PAVIMENO/ MEZCLA ASFÁLTICA/ METODO MARSHALL/ METODO SUPERPAVE/ AGREGADO MINERAL/ LIGANTE ASFÁLTICO/ ASFALTO ÓPTIMO.

1 Introducción



1.1 Planteamiento del problema

Los pavimentos asfálticos deben ser flexibles y tener una buena capacidad para deformarse sin deteriorar la mayor parte su estructura. Si no tienen un buen diseño se ve afectada esta capacidad y se generarían grandes problemas asociados con la circulación vehicular. Un buen método para el diseño de mezclas asfálticas que considere la circulación vehicular es fundamental para lograr un óptimo desempeño en la construcción de pavimentos asfálticos y así hacer una correcta predicción de su vida de servicio.

En Chile el método de diseño de pavimentos asfálticos que más se utiliza y cuyos parámetros se puede estimar de forma empírica mediante un análisis de laboratorio, es el método Marshall. Este método de diseño determina las propiedades del cemento asfáltico como un conjunto, estableciendo de esa manera una dosificación óptima. Distinto es el caso de otro método de diseño de pavimentos asfálticos, llamado método Superpave, el cual no es muy utilizado en Chile. Sus parámetros se pueden estimar de forma empírica mecanicista y considera un análisis de pruebas en el laboratorio para captar las propiedades de resistencia de los agregados minerales, además de determinar la viscosidad del asfalto para luego establecer una dosificación óptima.

Si se toma en cuenta que el método Superpave evalúa la mezcla asfáltica en forma individual (agregado mineral y asfalto) y su interacción cuando están mezclados, mientras que el sistema Marshall los analiza de manera conjunta, es posible poder establecer una alternativa al método de diseño actualmente utilizado.

Chile no es productor de asfalto, depende del mercado externo para lograr asfaltos con menor o mayor viscosidad, lo que repercute en las propiedades mecanicistas del mismo e influye directamente en la calidad y años de servicio de la estructura del pavimento. El método Superpave permite un mejor aprovechamiento del asfalto ya que se adecúa a las condiciones del tránsito vehicular.

En este trabajo de título se busca determinar las ventajas y desventajas de ambos métodos de diseño asfáltico, para determinar la mejor calidad del pavimento su relación directa en el aumento de su vida de servicio.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Analizar las ventajas y desventajas del método Marshall y del método Superpave para establecer cuál de ellos es más conveniente.

1.2.2 Objetivos específicos

- Replicar una dosificación de mezcla asfáltica de la ruta F-62 en el laboratorio mediante el método Marshall
- Diseñar una dosificación por el método Superpave considerando las condiciones específicas de la ruta F-62.
- Comparar a través de un análisis de laboratorio el diseño de pavimento asfáltico por el método Superpave con el del método Marshall el cual se utilizaría para el diseño de la ruta F-62.

1.3 Alcances

La parte experimental de este trabajo de título se realizó en el Laboratorio de Vialidad de la región de Valparaíso y en el Laboratorio Nacional de Vialidad. Mediante un análisis comparativo de pavimento flexible, basado en los métodos Marshall y Superpave, con los ajustes y complementos que aparecen descritos en el Manual de Carreteras. El análisis del diseño de las mezclas será para un camino regional principal con vida de diseño de 20 años, ubicado en la ruta F-62 perteneciente a la Región de Valparaíso, tomando en cuenta el tránsito vehicular.

La viscosidad del asfalto no se determinó según el método Superpave por salir del marco de trabajo adoptado. En su lugar se utilizó la dosificación entregada por la empresa proveedora.

1.4 Metodología de trabajo

Este trabajo de título está orientado a la entrega de información obtenida a través del análisis de los métodos de diseño de pavimentos asfálticos Marshall y Superpave en el Laboratorio de Vialidad de la región de Valparaíso y en el Laboratorio Nacional de Vialidad, con la finalidad de poder establecer con mayor claridad los procedimientos que llevan a implantar parámetros comparativos claros y precisos entre ambos métodos.

Primero es necesario entregar información adecuada acerca de los métodos Marshall y Superpave. Para ello es necesario un estudio del Manual de Carreteras, además de una revisión bibliográfica acerca de ambos métodos.

Luego a través de un análisis en el Laboratorio de Vialidad de la región de Valparaíso y en el Laboratorio Nacional de Vialidad, se reproducirá una dosificación del material asfáltico a través de la estimación empírica del método Marshall ya establecida por el MOP, para luego realizar la dosificación del mismo material a través de la estimación empírica mecanicista del método Superpave.

Tomando este análisis en cuenta se dará paso a la realización de un informe, que esclarecerá las diferencias más relevantes, logrando así determinar las ventajas y desventajas entre ambos métodos. Para finalmente determinar si en Chile existe una alternativa al método de diseño actual (método Marshall), como es el método Superpave en la ruta F-62.

Tabla 1.1- Proceso del diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall.

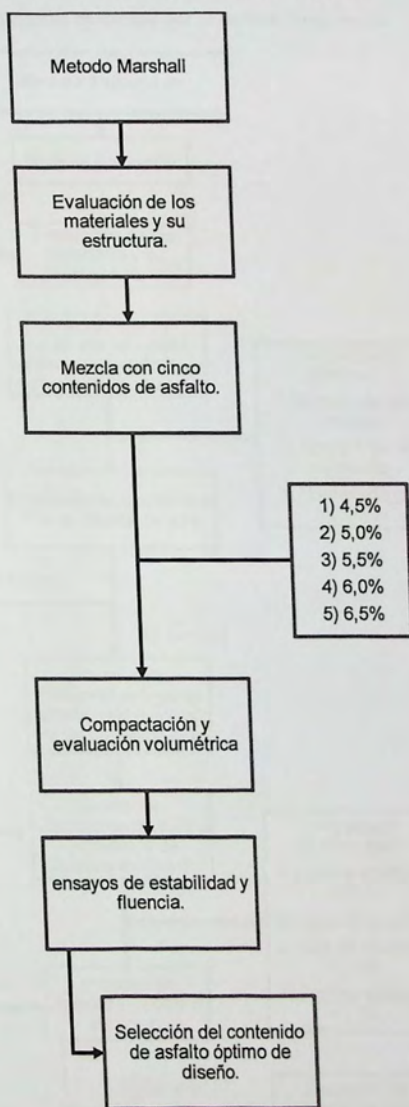
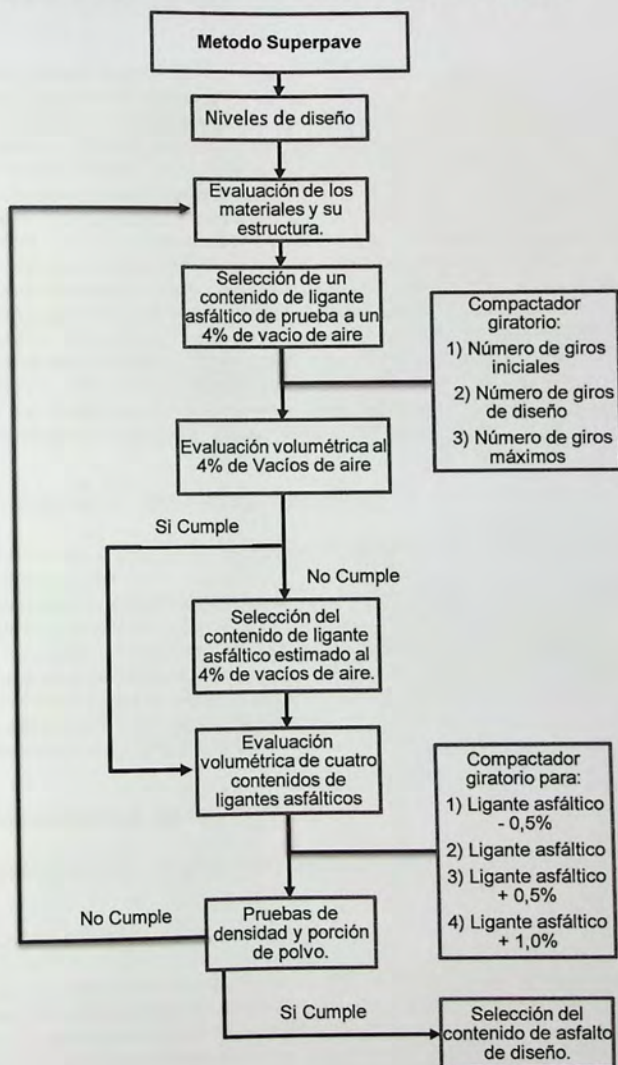


Tabla 1.2- Proceso del diseño de mezclas asfálticas por el método Superpave.



2 Método Marshall

El concepto del método Marshall en el diseño de mezclas para pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de diseño de mezclas. El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos arriba de 38 mm (1.5"), y está pensado para diseño en laboratorio y control en terreno de mezclas asfálticas en caliente, con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en terreno se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar. El método Marshall utiliza probetas de prueba estándar de 64 mm (2 1/2") de alto y 102 mm (4") de diámetro; las que se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto- agregado [1]. Los dos aspectos principales del método Marshall son la densidad-análisis de vacíos, y la prueba de estabilidad y flujo de los probetas compactadas; cabe mencionar que este proceso de diseño no tiene especificado pruebas para agregados minerales ni para cementos asfálticos.

2.1 Procedimiento del método Marshall

- 1) Se realiza una evaluación de los materiales y se determina una estructura de agregados minerales a utilizar.
- 2) La estructura de agregados previamente seleccionada se mezcla con 5 distintos contenidos de asfalto y se realizan por lo menos 3 probetas por cada contenido de ellas.
- 3) Se compactan las mezclas y se realizan ensayos volumétricos el cual corresponden a parámetros de densidades, volúmenes de vacíos de aire, volúmenes de vacíos en agregado mineral y volúmenes de vacíos llenados con asfalto.
- 4) Se realiza el ensayo de estabilidad y fluidez.
- 5) Se escoge el ligante asfáltico óptimo.

2.2 Características de los materiales

Los materiales requeridos son el ligante asfáltico y los agregados pétreos o agregados minerales.

2.2.1 Ligante asfáltico

El asfalto es un material muy impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. Presenta las propiedades ideales para la construcción de pavimentos, y son obtenidos a partir del proceso de destilación fraccionada del petróleo crudo. Físicamente el asfalto es un líquido viscoso o un sólido negro (figura 2.1), el cual está constituido esencialmente de hidrocarburos, principalmente del tipo nafténicos y aromáticos.

El ligante asfáltico utilizado en este trabajo de tesis es un CA-24 suministrado por la empresa proveedora. Está especificado en función de su viscosidad a 60 ° C, es sólido a temperatura ambiente y es bombeable a partir de los 125° C.

Figura 2.1- Ligante asfáltico.



La empresa proveedora entrega la siguiente tabla de especificaciones del CA-24.

Tabla 2.1- Especificaciones de cemento asfáltico según grado de viscosidad [2].

Viscosidad Absoluta a 60°C, 30cm de Hg. Poises	Min. 2400 P
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm.	+100
Ensaye de la mancha heptano/ xilol, % xilol	Máx. 30
Solubilidad en Tricloretileno	Min 99.0
Punto de Inflamación, °C.	Min 232
Punto de ablandamiento, ° C	Informar
Índice de Penetración, IP	-1,5 a + 1
ENSAYE PELICULA DELGADA ROTATORIA	
Perdida por calentamiento, %	Máx. 0,8
Viscosidad Absoluta a 60°C, 300 mm Hg, Poises	Informar
Ductilidad de residuo a 25°C, 5 cm/min, cm	Min.100
Índice de durabilidad	Máx 3.5

2.2.2 Agregados pétreos

Son materiales granulares sólidos e inertes, que se emplean en las capas de las carreteras con granulometrías adecuadas. Se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, a través de su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos.

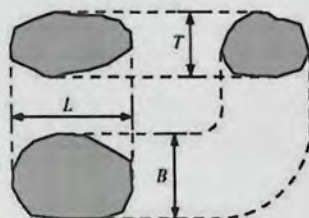
El agregado constituye en la mayoría de las estructuras de pavimento entre el 90% y el 95% en peso, y entre el 75% y el 85% en volumen.

Para el agregado mineral se utilizarán tres tipos de muestras procedentes del río Aconcagua:

- Gravilla 11/17
- Gravilla 5/11
- Polvo Roca 0/5

La Gravilla 11/17 corresponde al tamaño de las partículas entre 11 a 17 mm probable (figura 2.2), lo mismo sucede con gravilla 5/11 y polvo roca 0/5.

Figura 2.2- Gravilla.



Para determinar las constantes de áridos más relevantes usadas en el método Marshall se necesitará realizar los siguientes análisis para cada material, cabe destacar que los puntos E y F sólo hacen referencia para el material polvo roca:

- A. Granulometría
- B. Densidad real seca, densidad neta y absorción
- C. Densidad aparente suelta
- D. Cubicidad de partículas
- E. Densidades y absorción de pétreos finos
- F. Densidad del integral

2.2.2.1 Gravilla 11/17

A. Granulometría

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar granulometría.

Tabla 2.2- Masa mínima para realizar granulometría [3].

Tamaño máximo absoluto de las partículas (mm).	Masa mínima de muestra (Kg).
80	32
63	25
50	20
40	16
25	10
19	8
12,5	5
10	4

Para los ensayos se debe seleccionar una cantidad de árido, el cual al secarlo en el horno deba tener una masa mayor a los 8000 g, ya que la gravilla 11/17 tiene un tamaño máximo probable de 17 mm. Se escoge el tamaño máximo absoluto de 19mm por el cual pasa el 100% del material.

Después de secarlo completamente se iniciará el tamizado, donde se determinarán los porcentajes del árido que pasa por cada tamaño de tamiz.

Peso muestra total	=	8381	g
Peso muestra lavada seca	=	8237	g

Tabla 2.3- Porcentaje que pasa por el tamizado.

Tamaño de tamiz (NCh)	Tamaño de tamiz (ASTM)	Peso retenido		% que pasa
		Peso retenido (g)	% retenido	
(mm)	(inch)			
50	2"	-	-	-
40	1 1/2"	-	-	-
25	1"	-	-	-
19	3/4"	-	-	100
12,5	1/2"	5221	62	38
10	3/8"	2766	33	5
5	N° 4	99	1	4
2,5	N° 8	52	1	3
1,25	N° 16	-	-	-
0,63	N° 30	-	-	-
0,315	N° 50	-	-	-
0,16	N° 100	-	-	-
0,08	N° 200	94	1	2
R		0	-	-

B. Densidad real seca, densidad neta y absorción

Corresponde a la cantidad mínima de muestra según tamaño máximo absoluto del árido.

Tabla 2.4- Masa mínima para realizar ensayos de densidades y absorción [4].

Tamaño máximo absoluto de las partículas (mm)	Masa mínima de muestra (g)
12,5	2000
19	3000
25	4000
40	5000
50	8000

La masa mínima de muestra fue de 3000 g.

Tabla 2.5- Densidad real seca, densidad neta y absorción.

muestras		M1	M2	Unidades
PSS	X	4270	4228	g
peso bajo agua	Y	2685	2657	g
peso seco	Z	4220	4177	g
densidad real seca	ρ_{RS}'	2662	2659	kg/m ³
densidad neta	ρ_N'	2749	2748	kg/m ³
absorción	α'	1,18	1,22	%
densidad real seca promedio	ρ_{RS}	2661		kg/m ³
densidad neta promedio	ρ_N	2749		kg/m ³
Absorción promedio	α	1,2		%

La muestra se pesa en un canastillo sumergido en agua a $20 \pm 3^\circ\text{C}$ por un periodo de 3 min para obtener el "peso bajo el agua".

El peso superficialmente seco de una probeta (PSS) se determina después de sacar la muestra húmeda del canastillo y secándola superficialmente con un paño absorbiendo la humedad superficial, luego se pesa obteniendo así el PSS. El manual de carreteras recomienda que este proceso sea sumamente rápido para una mayor precisión de los datos obtenidos.

Peso seco es el peso de la muestra totalmente seca, el cual se debe secar al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ para luego enfriarlo a temperatura de aproximadamente 30°C y posteriormente pesarlo.

A través de las siguientes ecuaciones se determina la densidad real seca, densidad neta y absorción:

Ecuación 2.1- Densidad real seca

$$\rho_{RS} = \frac{Z}{X - Y} \times 1000$$

Ecuación 2.2- Densidad neta

$$\rho_N = \frac{Z}{Z - Y} \times 1000$$

Ecuación 2.3- Absorción

$$\alpha = \frac{X - Z}{Z} \times 100$$

Después se determinan los parámetros de las densidades y el de absorción promedios para ambas muestras (M1 y M2).

C. Densidad aparente suelta

Para la obtención de la densidad aparente suelta se determina el volumen de ésta, se pesan las dos muestras y se determina un promedio el cual sería la masa promedio, después se calcula la diferencia entre la masa medida y la masa del recipiente para obtener la masa de la muestra suelta. Para finalizar se determina la densidad aparente suelta entre la masa suelta y el volumen.

Para calcularlas se utilizan las siguientes ecuaciones:

Ecuación 2.4- Masa de la muestra suelta

$$Ms = Mp - Mm$$

Ecuación 2.5- Densidad aparente suelta

$$\rho_{as} = \frac{Ms}{V}$$

Tabla 2.5- Densidad aparente suelta.

Volumen medida	V	3,018	lt
Masa medida (recipiente)	Mm	2500	g
Masa material + masa medida	1	6804	g
	2	6821	g
Masa promedio	Mp	6813	g
Masa muestra suelta	Ms	4313	g
Densidad aparente	ρ_{as}	1430	kg/m ³

D. Cubicidad de partículas

Este método establece el procedimiento para determinar el contenido porcentual de partículas chancadas, rodadas y lajeadas de la fracción de un pétreo retenida en el tamiz de 5 mm.

Tabla 2.6- Cubicidad de las partículas [5].

Tamaño máximo absoluto de las partículas (mm)	Masa mínima de muestra (g)
50	2000
25	1000
19	500
12,5 y menor	250

Tabla 2.7- Pesos chancados y rodados.

Peso muestra total	M =	587,4	g
Peso material chancado	N =	570,2	g
Peso material rodado	O =	17,2	g
Peso laja chancada	P =	0	g
Peso laja rodada	Q =	0	g

Cumpliendo con la masa mínima se puede proseguir con el análisis de chancado, rodado y partículas lajeadas.

Tabla 2.8- Porcentajes de chancado, rodado y lajas.

Chancado total	$(N + P)/M =$	97	%
Rodado	$(O + Q)/M =$	3	%
Lajas	$(P + Q)/M =$	0	%

2.2.2.2 Gravilla 5/11

Se realizan los ensayos para determinar:

- A. Granulometría
- B. Densidad real seca, densidad neta, absorción, densidad aparente y cubicidad.

Para este tipo de material el tamaño de tamiz máximo es de 12,5 mm.

- A. Granulometría

Tabla 2.9- Porcentaje que pasa gravilla 5/11.

	NCh (mm)	ASTM (inch)	Gravilla 5/11 % que pasa
Tamiz de	50	2"	-
Tamiz de	40	1 1/2"	-
Tamiz de	25	1"	-
Tamiz de	19	3/4"	-
Tamiz de	12,5	1/2"	100
Tamiz de	10	3/8"	74
Tamiz de	5	Nº 4	4
Tamiz de	2,5	Nº 8	2
Tamiz de	1,25	Nº 16	-
Tamiz de	0,63	Nº 30	-
Tamiz de	0,315	Nº 50	-
Tamiz de	0,16	Nº 100	-
Tamiz de	0,08	Nº 200	-

- B. Densidad real seca, densidad neta, absorción, densidad aparente y cubicidad.

Tabla 2.10- Densidades, partículas chancadas y lajeadas para gravilla 5/11.

	Unidades	Gravilla 5/11
Densidad aparente	kg/m ³	1460
Densidad real seca	kg/m ³	2644
Densidad neta	kg/m ³	2744
Partículas chancadas	%	100
Partículas lajeadas	%	0

En el anexo A aparecen los procedimientos de cálculo.

2.2.2.3 Polvo roca 0/5

Se realizan los ensayos para determinar:

- 1) Granulometría
- 2) Densidad real seca, densidad neta, absorción, densidad aparente y cubicidad.
- 3) Densidades y absorción de pétreos finos
- 4) Densidad del integral

En el anexo A aparecen los procedimientos de cálculo.

Para este material el tamaño máximo de tamiz es de 10 mm.

A. Granulometría

Tabla 2.11- Porcentaje que pasa polvo roca.

	NCh	ASTM	Polvo Roca 0/5
	(mm)	(inch)	% que pasa
Tamiz de	50	2"	-
Tamiz de	40	1 1/2"	-
Tamiz de	25	1"	-
Tamiz de	19	3/4"	-
Tamiz de	12,5	1/2"	-
Tamiz de	10	3/8"	100
Tamiz de	5	N° 4	92
Tamiz de	2,5	N° 8	62
Tamiz de	1,25	N° 16	-
Tamiz de	0,63	N° 30	31
Tamiz de	0,315	N° 50	22
Tamiz de	0,16	N° 100	16
Tamiz de	0,08	N° 200	12

B. Densidad real seca, densidad neta, absorción, densidad aparente y cubicidad.

Tabla 2.12- Densidades, partículas chancadas y lajeadas para polvo roca.

	Unidades	Polvo Roca 0/5
Densidad aparente	kg/m ³	1600
Densidad real seca	kg/m ³	2663
Densidad neta	kg/m ³	2741
Partículas chancadas	%	100
Partículas lajeadas	%	0

E. Densidades y absorción de pétreos finos [6].

Según el Manual de Carreteras se pueden determinar las densidades y absorción de los pétreos finos aplicando las formulas.

Ecuación 2.6- Densidad real seca de pétreos finos

$$\rho_{RS} = \frac{C}{A + B - D} \times 1000$$

Ecuación 2.7- Densidad neta de pétreos finos

$$\rho_N = \frac{C}{A + C - D} \times 1000$$

Ecuación 2.8- Absorción de pétreos finos

$$\alpha = \frac{B - C}{C} \times 100$$

Tabla 2.13- Densidades y absorción de pétreos finos.

		Muestra 1	Muestra 2	Unidades
Peso Matraz + agua	A	648,8	657,5	g
PSS	B	197,3	199	g
Peso seco	C	196,5	198,5	g
Peso Matraz + agua hasta calibración	D	771,5	781,3	g
Densidad real seca		2634	2640	kg/m ³
Densidad neta		2663	2657	kg/m ³
Absorción		1,4	1,3	%
Promedio densidad real seca		2637		kg/m ³
Promedio densidad neta		2660		kg/m ³
Promedio absorción		1,4		%

F. Densidad del integral [6].

Corresponden a los datos obtenidos a través de un tamiz de referencia, el cual es de 2,5 mm de abertura y se determinan sus densidades y absorción de la misma manera que en el punto anterior.

Tabla 2.14- Densidad del integral.

Tamiz referencia (mm)	2,5	mm
% que pasa tamiz referencia	62	%
Densidad real seca del integral	2647	kg/m ³
Densidad neta del integral	2691	kg/m ³
Absorción del integral	1,3	%

2.3 Característica para la mezcla

Tras obtener los datos principales de los áridos, se realiza una comparación entre los datos de la empresa proveedora y los alcanzados en este trabajo de título. No debería existir una gran diferencia entre ambos análisis, y se tendría que cumplir con la especificación de la banda IV-A-12 [7].

2.3.1 Granulometría

Tabla 2.15- Granulometría propia y empresa proveedora.

NCh	ASTM	Granulometría Emp. Proveedora			Granulometría Propia		
		Gravilla 11/17	Gravilla 5/11	Polvo Roca 0/5	Gravilla 11/17	Gravilla 5/11	Polvo Roca 0/5
	(mm)	%que pasa	%que pasa	%que pasa	%que pasa	%que pasa	%que pasa
Tamiz de 50	2"	-	-	-	-	-	-
Tamiz de 40	1 1/2"	-	-	-	-	-	-
Tamiz de 25	1"	-	-	-	-	-	-
Tamiz de 19	3/4"	100	-	-	100	-	-
Tamiz de 12,5	1/2"	32	100	-	38	100	-
Tamiz de 10	3/8"	1	74	100	5	74	100
Tamiz de 5	N° 4	-	3	92	4	4	92
Tamiz de 2,5	N° 8	-	1	62	3	2	62
Tamiz de 1,25	N° 16	-	1	40	-	-	-
Tamiz de 0,63	N° 30	-	1	28	-	-	31
Tamiz de 0,315	N° 50	-	-	21	-	-	22
Tamiz de 0,16	N° 100	-	-	15	-	-	16
Tamiz de 0,08	N° 200	-	-	11	2	-	12

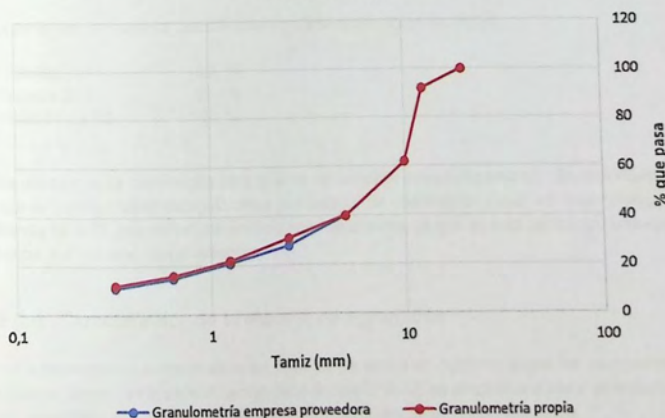
En forma gráfica se observaran los siguientes resultados:



Granulometría Arido 5/11



Polvo roca 0/5



2.3.2 Constantes físicas e hídricas

Tabla 2.16- Constantes físicas e hídricas.

	Unidades	Granulometría Emp. Proveedora			Granulometría Propia		
		Gravilla 11/17	Gravilla 5/11	Polvo Roca 0/5	Gravilla 11/17	Gravilla 5/11	Polvo Roca 0/5
Densidad aparente	kg/m ³	1458	1430	1736	1430	1460	1600
Densidad real seca	kg/m ³	2652	2640	2648	2661	2644	2663
Densidad neta	kg/m ³	2739	2741	2750	2749	2744	2741
Partículas chancadas	%	96	97	100	97	100	100
Partículas lajeadas	%	0	0	0,3	0	0	0
Índice de laja	%	7,4	14	6,1	-	-	-
Desgaste los Ángeles	%	10	14	16	-	-	-
	Grado N°	5	6	7	-	-	-
Índice de plasticidad	%	0	0	0	-	-	-

No hay variaciones significativas en relación a los datos ya que la máxima variación es de un 8% ubicado en el polvo roca 0/5, por lo cual se puede proseguir.

2.3.3 Dosificación de áridos en peso

La dosificación de áridos en peso se determina mediante la especificación de la banda IV-A-12, la cual consiste en mezclar los tres tipos de áridos (gravilla 11-17; gravilla 5-11; polvo roca 0-5) de tal manera que se cumpla con las especificaciones de los áridos.

La empresa proveedora determino la siguiente dosificación de áridos:

Gravilla 11/17	20 %
Gravilla 5/11	28 %
Polvo Roca 0/5	52 %

Se utilizará dicha dosificación para que los parámetros sean comparables. Es importante destacar que se podrían haber escogido otros porcentajes de dosificación y aun así haber cumplido con la Banda IV-A-12, esto no tendría sentido para los análisis, ya que se está replicando una dosificación hecha por una empresa proveedora.

2.3.4 Característica de la mezcla de agregados

Para determinar si la dosificación en peso de los áridos en conjunto según las características de la mezcla cumple con la especificación de la Banda IV-A-12, se procederá a pesar el material retenido en cada tamiz y se determina si el porcentaje cumple con las especificaciones.

Para que exista menos rango de error, en este análisis se utilizarán dos bolsas del mismo material y mismo tamaño.

N° bolsas	2
Peso X bolsa (g)	1100

Ya obtenida la dosificación con anterioridad, se podrá determinar el peso de cada bolsa y el total de cada material.

Tabla 2.17- Peso por material.

	Dosificación	peso x bolsa (g)	peso total (g)
Gravilla 11/17	20%	220	440
Gravilla 5/11	28%	308	616
Polvo Roca 0/5	52%	572	1144

A su vez al tener la granulometría es posible determinar el peso de cada tamiz con su respectivo material.

Tabla 2.18- Peso de cada tamiz por cada material.

Tamiz	Gravilla 11/17				Gravilla 5/11				Polvo Roca 0/5			
	%pasa	%ret	peso un (g)	peso total (g)	%pasa	%ret	peso un (g)	peso total (g)	%pasa	%ret	peso un (g)	peso total (g)
3/4	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/2	32	68	149,6	299,2	100	-	-	-	-	-	-	-
3/8	1	31	68,2	136,4	74	26	80,1	160,2	100	-	-	-
4	-	-	-	-	3	71	218,7	437,4	92	8	45,8	91,5
8	-	-	-	-	1	2	6,2	12,3	62	30	177,8	355,5
Bajo#8	-	1	2,2	4,4	-	1	3,1	6,2	-	62	359,9	719,8

Los valores representados por el color rojo pertenecientes a la gravilla 11/17 y gravilla 5/11 fueron reemplazados por el material polvo roca para la realización de las bolsas, ya que al ser de valores tan bajos es difícil reconstituirlos con el material de las gravillas. Este procedimiento es válido, ya que los áridos vienen de la misma procedencia.

La siguiente tabla permite observar el peso acumulado de cada muestra para crear la bolsa.

Tabla 2.19- Resumen de peso de cada tamiz por material.

	Gravilla 11/17		Gravilla 5/11		Polvo Roca 0/5		
	1/2"	3/8"	3/8"	N° 4	N° 4	N° 8	Bajo N° 8
Granulometría (g)	149,6	68,2	80,1	218,7	45,8	177,8	359,9
Granulometría acum. (g)	149,6	217,8	297,88	516,56	562,32	740,08	1100

Después de que se mezclaron los materiales y se obtuvo el peso aproximado de 1100 gramos, se tamiza nuevamente el material para verificar su cumplimiento con la banda IV-A-12 y su correspondencia con lo medido por la empresa proveedora.

Figura 2.3- Tamices.



Tabla 2.20- Porcentaje de material que pasa por cada tamiz.

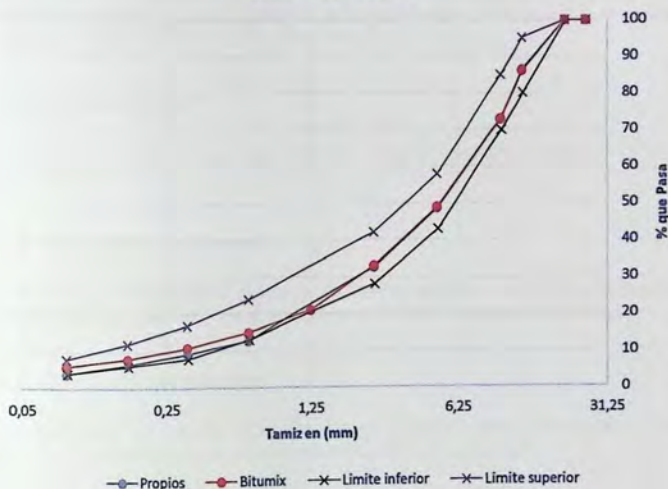
	NCh	ASTM	Peso x	Propios		Emp. Proveedora	Banda
	(mm)	(inch)	Tamiz (g)	% ret acum	% pasa	% pasa	VI-A-12
Tamiz de	25	1"	0,0	0	100	100	100-100
Tamiz de	19	3/4"	0,0	0	100	100	100-100
Tamiz de	12,5	1/2"	149,6	14	86	86	80-95
Tamiz de	10	3/8"	148,3	27	73	73	70-85
Tamiz de	5	N° 4	264,5	51	49	49	43-58
Tamiz de	2,5	N° 8	177,8	68	32	33	28-42
Tamiz de	1,25	N° 16	-	-	-	21	-
Tamiz de	0,63	N° 30	214,9	87	13	15	13-24
Tamiz de	0,315	N° 50	39,8	91	9	11	8-17
Tamiz de	0,16	N° 100	31,8	94	6	8	6-12
Tamiz de	0,08	N° 200	25,4	96	4	6	4-8
Tamiz de	Residuo		43,8	-	-		

Una vez tamizado el material se determinan los pesos retenidos en cada tamiz y se obtendrá el porcentaje retenido acumulado, para así determinar el porcentaje de material que pasa por dicho tamiz. Con eso se verifica su cumplimiento con la banda.

La suma de las masas acumuladas en los tamices no necesariamente se corresponde con los 1100g originales. La diferencia entre ambos valores se denomina pérdida, que en este caso es de 4g.

Es importante destacar que como la Banda IV-A-12 no especifica malla N°16, esta no es tamizada.

Banda IV-A-12



Todos los parámetros cumplen con la especificación de la Banda IV-A-12.

Tras tener valores similares a la empresa proveedora se puede asumir:

Tabla 2.21- Parámetros granulométricos empresa proveedora.

	un	Emp. proveedora	límites
Partículas chancadas	%	98	min 90
Partículas lajeadas	%	0	max 10
Índice de lajas	%	9	-
Desgaste los Ángeles	%	14	max 25
Índice de plasticidad	%	N.P.	N.P.
Sales solubles	%	0,2	max 25
Adherencia método estático	%	+95	min 95
Adherencia Riedel-Weber	%	9-10	min 0-5
Equivalente de arena	%	54	min 50
Desintegración en sulfato de sodio F. Gruesa	%	0,71	max 12
Desintegración en sulfato de sodio F. Fina	%	0,71	max 15
Densidad real seca ponderada	kg/m ³	2647	-
Densidad efectiva	kg/m ³	2658	-
Absorción de asfalto	%	0,17	-

2.4 Visación Marshall

Para determinar el porcentaje de asfalto óptimo a utilizar se deben realizar al menos tres muestras compactadas (probetas) para cada contenido de asfalto, en este caso se utilizarán cinco diferentes porcentajes de ligante asfáltico como indica el manual de carreteras [8].

2.4.1 Ligante asfáltico

Los cinco porcentajes de ligante asfáltico para determinar el asfalto óptimo son: 4,5%; 5,0%; 5,5%; 6,0% y 6,5%.b.

2.4.2 Reconstitución Marshall

Para determinar el asfalto óptimo lo primero es realizar quince bolsas iguales (tres probetas por cada porcentaje de asfalto) de 1100 g de áridos. Este procedimiento se observó en el anexo B.

2.4.3 Confección de probetas

Para confeccionar las probetas primero se prepara la mezcla, luego se compacta y después desmolda. Este proceso se repite para todas las confecciones necesarias.

2.4.3.1 Preparación de muestras

Lo primero es calcular el porcentaje de asfalto que utilizará, ya que luego de ser calentado a su temperatura de mezclado éste no se puede reutilizar, porque las propiedades serían diferentes y los resultados no serían fidedignos. El asfalto se calienta al horno por lo menos una hora antes de utilizarlo.

Después de que se preparan las bolsas de áridos, se colocan en un recipiente al horno junto con el bol de mezclado asfalto-árido. Estas deben tener temperaturas aproximadas a 30°C sobre la temperatura de mezclado, que en el caso de este trabajo es de 156±3°C.

Después de haber calentado los materiales al horno se saca el árido a unos 156 °C y se coloca en el bol, luego se debe pesar el material sin asfalto (debería existir una pequeña pérdida de material) para finalmente determinar el peso del asfalto que se deberá utilizar (figura2.6).

$$\text{Peso Asfalto (g)} = \% \text{ asfalto} \times \text{Peso material (g)}$$

No siempre se puede colocar el valor exacto del peso del asfalto cuando se mezclan, ya que este paso debe ser muy rápido para que no exista una pérdida muy grande de temperatura.

Figura 2.4- Proceso de mezclado



Tabla 2.22- Confección de probetas.

% Asfalto	Temp Mezclado °C	Temp Comp °C	N° Probeta	Peso Material (g)	Peso Asfalto (g)
4,5	156±3	147±3	1	1094,9	49,4
			2	1095,3	49,4
			3	1095,7	49,4
5,0	156±3	147±3	1	1096,9	54,9
			2	1091,8	54,7
			3	1097,0	54,9
5,5	156±3	147±3	1	1096,5	60,3
			2	1097,3	60,3
			3	1096,9	60,5
6,0	156±3	147±3	1	1096,5	65,7
			2	1096,1	65,9
			3	1094,1	65,8
6,5	156±3	147±3	1	1096,0	71,4
			2	1095,0	71,3
			3	1095,7	71,2

Después del cálculo del peso del asfalto, este se agrega al árido a temperatura de mezclado en el bol, se retira de la pesa y se coloca en la bandeja con arena (el cual distribuye el fuego del mechero uniformemente, manteniendo así la temperatura), se mezcla rápidamente hasta que la aleación quede totalmente cubierta y uniforme.

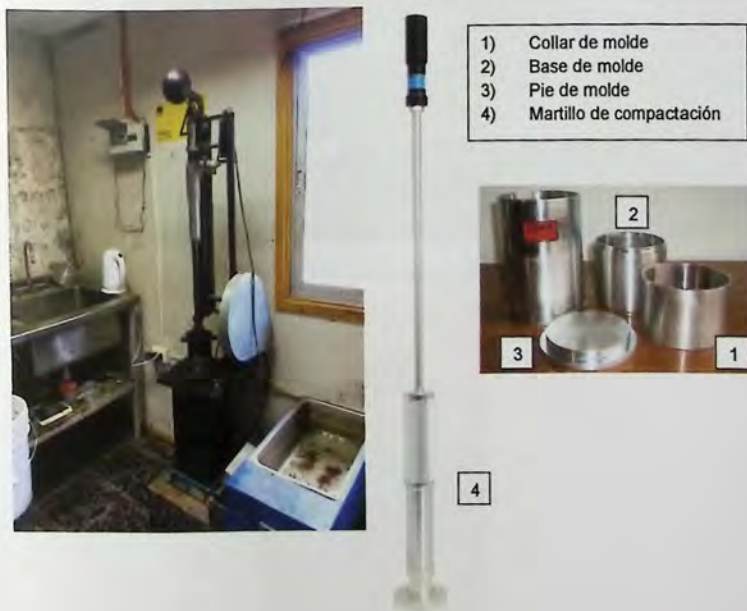
2.4.3.2 Compactación de probetas

Mientras los materiales se calientan al horno cerca de un mechero, se calientan la espátula, el collar del molde, las bases de molde, el pié de molde y el martillo de compactación previamente limpios y sin residuos (figura 2.5).

Luego el pié de molde se coloca en el compactador Marshall y después el molde para llenarlo con el material mezclado. Con una espátula se llena con la mezcla acomodándola quince veces en el perímetro y diez veces en el centro. Este proceso debe ser muy veloz para que se mantenga la temperatura de compactación, ya que podría afectar en la compactación.

Se coloca el martillo de compactación y se procede a aplicar los setenta y cinco golpes del compactador. Al terminar se saca la base y el collar del molde, se invierte y se reensambla para compactar la mezcla en el otro sentido con los setenta y cinco golpes. Después de compactar se saca la base y se deja enfriar un lapso de 12hr para asegurar su enfriamiento.

Figura 2.5- Compactador Marshall y sus partes.



2.4.3.3 Desmoldar probeta confeccionada

Después de pasar la noche enfriando las probetas (figura 2.6) se desmoldan con una prensa hidráulica (figura 2.7).

Figura 2.6- Probetas compactadas.



Figura 2.7- Desmoldar probeta.



2.5 Porcentaje de asfalto óptimo

El porcentaje de asfalto se designa por Pb. Para calcular el porcentaje de asfalto óptimo (Pb óptimo) se usan los siguientes parámetros Marshall.

2.5.1 Parámetros Marshall

- Densidad de la mezcla compactada
- Fluencia y estabilidad
- Densidad máxima de la mezcla (Dmm)
- Porcentaje de volúmenes de vacío de aire en la mezcla
- Vacíos en el agregado mineral
- Porcentaje de volúmenes de vacío con asfalto

2.5.2 Determinación de la absorción de agua y densidad de las probetas

2.5.2.1 Peso seco

El peso seco es determinado pesando la probeta en una balanza a temperatura ambiente (25°C aproximadamente).

Para determinar las densidades y las absorciones de agua se necesita tener una balanza que por lo menos soporte 2000 g, la cual debe estar equipada con un aparato de suspensión bajo el agua para poder pesar la muestra suspendida.

2.5.2.2 Peso bajo agua

El aparato de suspensión conectada a una balanza, se sumerge en un recipiente con agua a una temperatura de $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$. Se sumerge la probeta y se coloca en el aparato de suspensión entre 3 a 5 min para saber su peso bajo el agua como se muestra en la figura 2.8.

Figura 2.8- Probeta sumergida.



2.5.2.3 Peso superficialmente seco

Este peso se determina después de sacar la probeta sumergida bajo agua, para después secar con una toalla sólo superficialmente y finalmente pesarla.

2.5.2.4 Absorción de agua

Este se determina a través de la siguiente ecuación:

Ecuación 2.9- Absorción de agua de la probeta asfáltica.

$$A_{ab} = \frac{B - A}{B - C} \times 100 (\%)$$

Donde:

- A_{ab} : Absorción de agua
- A : Peso seco (g)
- B : Peso superficialmente seco (g)
- C : Peso bajo agua (g)

Si la absorción de agua es mayor que 2% se deben recalcular los parámetros. Para ello se recubre la parte exterior de la probeta con parafina y se pesa. Pero en este diseño todos los parámetros son menores que 2%, por lo cual es posible continuar para determinar las densidades.

2.5.2.5 Densidad de cada probeta

La densidad de cada probeta se determina a través de la relación de pesos y densidad del agua expresada en la siguiente ecuación:

Ecuación 2.10- Densidad de la probeta asfáltica.

$$G = \frac{A \times 1000 \times \rho_w}{B - C} (kg/m^3)$$

Donde:

- G : Densidad
- A : Peso seco (g)
- B : Peso superficialmente seco (g)
- C : Peso bajo agua (g)
- ρ_w : Densidad del agua (1 g/cm³)

Al final se promedian las tres densidades para tener la densidad final para cada porcentaje de asfalto definido.

2.5.2.6 Resumen de densidades y absorciones.

En esta tabla se muestran los datos obtenidos.

Tabla 2.23- Densidades y absorciones de la mezcla.

Determinación de la Absorción de agua y Densidad de las Briquetas								
% Asfalto	Pesos (g)					Absorción	Densidad	Promedio
	Seco	Seco	Bajo agua	Bajo agua	PSS	Agua (%)	(kg./m3)	Densidad
		c/Parafina		c/Parafina				(kg./m3)
4,5	1135,0	-	653,6	-	1142,0	1,4	2323,9	2323,3
	1134,7	-	652,5	-	1141,8	1,5	2319,0	
	1136,5	-	655,5	-	1143,9	1,5	2327,0	
5,0	1137,3	-	656,6	-	1144,9	1,6	2329,1	2340,1
	1138,4	-	657,7	-	1145,0	1,4	2336,1	
	1141,8	-	661,1	-	1145,9	0,8	2355,2	
5,5	1141,8	-	657,7	-	1145,2	0,7	2342,2	2347,6
	1143,2	-	663,5	-	1149,3	1,3	2353,2	
	1140,6	-	656,6	-	1142,5	0,4	2347,4	
6,0	1146,5	-	659,4	-	1147,7	0,2	2347,9	2343,3
	1145,5	-	656,8	-	1146,3	0,2	2340,1	
	1145,9	-	657,6	-	1146,9	0,2	2341,9	
6,5	1139,1	-	651,1	-	1139,7	0,1	2331,4	2330,6
	1135,3	-	648,8	-	1136,4	0,2	2328,3	
	1143,9	-	654,6	-	1145,1	0,2	2332,1	

No se utilizó el método de cálculo de densidades cubiertas con parafina ya que las absorciones medidas resultaron menores a un 2%.

2.5.3 Determinación de fluidez y estabilidad de las probetas

A través de este ensayo se podrá determinar la fluidez de cada probeta y la estabilidad con los datos de calibración de la máquina y la carga obtenida.

Para determinar la estabilidad de las probetas se debe calcular su altura.

2.5.3.1 Determinación de las alturas de las probetas [9]

Después de desmoldar las probetas confeccionadas, para cada una se mide la altura en cuatro puntos distintos y se determina su promedio. Este promedio es la altura de cada probeta.

Tabla 2.24- Determinación de las alturas de las probetas.

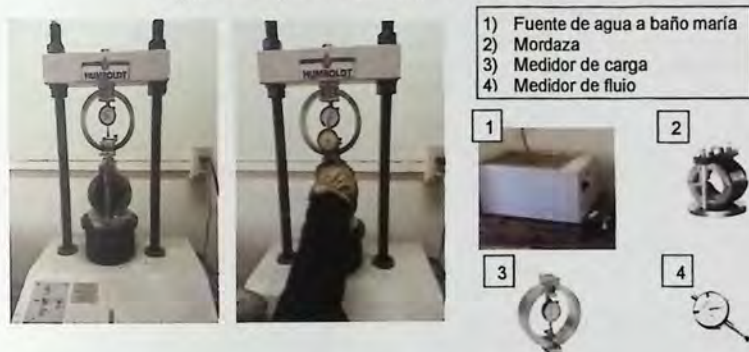
% Asfalto	Nº Probeta	Altura (mm)				
		h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	Promedio (mm)
4,5	1	61,7	61,7	61,8	61,6	61,7
	2	64,0	64,3	63,9	63,9	64,0
	3	61,7	61,6	61,8	61,8	61,7
5,0	1	60,1	60,2	60,1	60,0	60,1
	2	63,6	63,6	63,6	63,7	63,6
	3	60,6	60,7	60,8	60,7	60,7
5,5	1	60,8	60,8	61,0	60,9	60,9
	2	63,2	63,3	63,3	63,3	63,3
	3	61,7	61,8	62,0	61,9	61,9
6,0	1	61,8	61,8	61,8	61,9	61,8
	2	62,3	62,4	62,3	62,3	62,3
	3	62,0	62,0	62,0	62,2	62,1
6,5	1	61,0	60,8	60,2	60,2	60,6
	2	62,6	62,6	62,9	63,0	62,8
	3	62,3	62,3	62,5	62,5	62,4

2.5.3.2 Procedimiento

Para determinar la estabilidad y fluencia de las probetas se debe sumergir el espécimen en un baño María a $60 \pm 1^\circ\text{C}$ entre 30 a 40 minutos y luego utilizar la máquina de estabilidad (figura 2.9).

El baño María o es un método empleado en laboratorio para conferir temperatura uniforme a una sustancia líquida o sólida o para calentarla lentamente, sumergiendo el recipiente que la contiene en otro mayor con agua u otro líquido que se lleva a o está en ebullición. Para este ensaye será con agua.

Figura 2.9- Máquina estabilidad Marshall y sus partes.



Antes de retirar las probetas bajo agua se debe limpiar la mordaza y calentar las mismas, manteniendo una temperatura entre 21 a 38°C , después se lubrica con aceite.

Se sacan las probetas del agua y se secan superficialmente, luego se colocan en la mordaza inferior, para luego poner la mordaza superior y se centra el conjunto en el equipo.

Luego con la maquina se aplica carga a la probeta a una velocidad constante de deformación de 50 ± 1 mm/min, hasta que se produzca la falla. Al mismo tiempo se sujeta el medidor de flujo sobre la barra guía para anotar la carga máxima (dato relevante para la obtención del dato de la estabilidad) y la lectura de fluidez expresadas en 1/100 pulgadas. Esta prueba no deberá durar más de 30 segundos.

Se repite el mismo proceso para todas las probetas.

2.5.3.3 Cálculo de la fluidez

Tras obtener los datos de fluidez del medidor de flujo el cual ya estaba expresado en pulgadas, solo se debe hacer un promedio de las tres probetas con la misma cantidad de asfalto y determinar su fluencia. La fluencia debe estar en el rango de los $8-16 \times 0,01''$.

2.5.3.4 Cálculo de la estabilidad

Para el cálculo de estabilidad se necesita la carga máxima obtenida, la curva de carga mostrada en el certificado de calibración de la máquina apéndice A y el factor de corrección de altura para estabilidad Marshall cuyas tablas se encuentra en el apéndice B.

Primero se anota la carga obtenida, luego se calcula la estabilidad a través de la curva de ajuste, después se calcula la estabilidad de la probeta por el factor de corrección de la altura y por último se determina el promedio de estabilidad de las tres probetas, para establecer la estabilidad de esa cantidad de asfalto. La estabilidad debe ser mayor a 9000 N.

Tabla 2.25- Estabilidad y fluencia.

% Asfalto	Determinación de Fluidez y Estabilidad de las Briquetas						
	Fluidez	Estabilidad	Estabilidad	Factor	Estabilidad	Promedio	Promedio
	lectura (,01")	lectura (,0001")	grafico (KN)	corrección Altura	 (N)	fluidez (,01")	estabilidad (N)
4,5	16	349	14,6399	1,049	15357	14,7	13346
	12	265	11,1539	0,988	11020		
	16	310	13,0214	1,049	13659		
5,0	16	325	13,6439	1,099	14995	15,7	14872
	15	271	11,4029	1,084	12361		
	16	381	15,9679	1,081	17261		
5,5	17	360	15,0964	1,074	16214	17,3	14381
	20	298	12,5234	1,005	12586		
	15	327	13,7269	1,045	14345		
6,0	18	300	12,6064	1,046	13186	17,7	13749
	15	305	12,8139	1,032	13224		
	20	341	14,3079	1,037	14837		
6,5	20	307	12,8969	1,084	13980	18,0	13465
	16	304	12,7724	1,019	13015		
	18	310	13,0214	1,029	13399		

2.5.4 Densidad máxima de la mezcla

Para determinar la densidad máxima de la mezcla (Dmm) se utilizarán parámetros estimados como la densidad del asfalto y la densidad efectiva del agregado explicados en el manual de carreteras [10].

La densidad del asfalto, es la misma entregado por la empresa proveedora.

La densidad efectiva del agregado se considera la misma ya calculada por la empresa proveedora, ya que el agregado utilizado es exactamente el mismo y la variación sería mínima.

Densidad efectiva = 2658 kg/m³

Densidad asfalto = 1020 kg/m³

Este Dmm lo determinaremos de manera teórica:

Ecuación 2.11- Densidad máxima de la mezcla.

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

Dónde:

Dmm : Densidad máxima de la mezcla (kg/m³)

ρ_E : Densidad efectiva del agregado (kg/m³)

ρ_b : Densidad del asfalto (kg/m³)

Pb : Porcentaje del asfalto retenido en el agregado (%)

Asfalto C-24	% ref. ag.	4,5	5	5,5	6	6,5
Dmm	kg/m3	2486	2469	2453	2437	2421

2.5.5 Volumen de vacíos de aire en la mezcla

Para determinar los volúmenes de vacíos de aire (Va) se utiliza el Dmm de la mezcla. Manual de carreteras [10].

Con la siguiente ecuación se puede calcular el porcentaje de volúmenes de vacío:

Ecuación 2.12- Volumen de vacíos de aire en la mezcla.

$$Va = 100 \times \frac{D_{mm} - G}{D_{mm}}$$

Dónde:

Va : Volumen de vacíos de aire en la mezcla (%)

D_{mm} : Densidad máxima de la mezcla (kg/m³)

G : Densidad de la mezcla compactada (kg/m³)

Asfalto C-24	% ref. ag.	4,5	5	5,5	6	6,5
Volúmenes de vacío	%	6,5	5,2	4,3	3,8	3,7

Se aconseja que los porcentajes de Va sean del rango 4 – 6. Para los resultados obtenidos los volúmenes de vacío que cumplirían sería 5 y 5,5 % de asfalto.

2.5.6 Volumen de vacíos en el agregado mineral

Para determinar los vacíos en el agregado mineral se debe considerar que la densidad real seca del agregado será la estimada por la empresa proveedora. Manual de carreteras [10].

Densidad real seca del agregado = 2647 (kg/m³)

Ecuación 2.13- Volumen de vacíos en el agregado mineral.

$$VAM = 100 \times \left(1 - \frac{G}{\rho_{RS}} \times \frac{100}{100 + Pb} \right)$$

Dónde:

VAM : Volumen de vacíos en el agregado mineral (%)
 G : Densidad de la mezcla compactada (kg/m³)
 ρ_{RS} : Densidad real seca del agregado (kg/m³)
 Pb : Porcentaje del asfalto retenido en el agregado (%)

Asfalto C-24	% ref. ag.	4,5	5	5,5	6	6,5
VAM	%	16,0	15,8	15,9	16,5	17,3

Se aconseja que los porcentajes de VAM sean un mínimo del 14%.

2.5.7 Volumen de vacíos llenados con asfalto

Para determinar los volúmenes de vacíos llenados con asfalto (VFA) se utiliza el Va y VAM de la mezcla. Manual de carreteras [10].

Con la siguiente ecuación se calculará el porcentaje de volúmenes de vacío llenos:

Ecuación 2.14- Volumen de vacíos llenados con asfalto.

$$VFA = 100 \times \left(1 - \frac{Va}{VAM} \right)$$

Dónde:

VFA : Volúmenes de vacíos llenados con asfalto (%)
 Va : Porcentaje de volúmenes de vacíos de aire en la mezcla (%)
 VAM : Volumen de vacíos en el agregado mineral (%)

Asfalto C-24	% ref. ag.	4,5	5	5,5	6	6,5
VAM	%	59	67	73	77	79

2.5.8 Resumen de parámetros Marshall

Tabla 2.26- Parámetros Marshall.

Asfalto C-24	% ref. ag.	4,5	5	5,5	6	6,5	Limites
Dmm	kg/m ³	2486	2469	2453	2437	2421	-
Densidad	kg/m ³	2323,3	2340,1	2347,6	2343,3	2330,6	-
Va	%	6,5	5,2	4,3	3,8	3,7	4-6
VAM	%	16,0	15,8	15,9	16,5	17,3	min 14
VFA	%	59	67	73	77	79	-
Fluencia	0,01"	14,7	15,7	17,3	17,7	18,00	8-16
Estabilidad	N	13346	14872	14381	13749	13465	min 9000

2.5.9 Asfalto óptimo

Para la determinación del contenido óptimo de asfalto se consideran las curvas de densidad, estabilidad y volúmenes de vacíos de aire de la mezcla.

Tabla 2.27- Parámetros relevantes para determinación asfalto óptimo.

Asfalto C-24	% ref. ag.	4,5	5	5,5	6	6,5
Densidad	kg/m ³	2323	2340	2348	2343	2321
Va	%	6,5	5,2	4,3	3,8	3,7
Estabilidad	N	13346	14872	14381	13749	13465

Contenido de asfalto óptimo se calcula a través de la siguiente ecuación:

Ecuación 2.15- Ligante asfáltico óptimo.

$$Pb_{\text{óptimo}} = \frac{Pb_{\text{estabilidad}} + Pb_{\text{densidad}} + Pb_{5\% \text{ huecos}}}{3}$$

Donde:

- $Pb_{\text{estabilidad}}$: Porcentaje de asfalto el cual pertenece al mayor valor de estabilidad
- Pb_{densidad} : Porcentaje de asfalto el cual pertenece al mayor valor de densidad
- $Pb_{5\% \text{ huecos}}$: Porcentaje de asfalto el cual pertenece al 5% de volúmenes de vacíos de aire

Tomando en cuenta los resultados obtenidos se determinarán las variables:

- $Pb_{\text{estabilidad}}$ = 5 % de Asfalto
- Pb_{densidad} = 6 % de Asfalto

Para determinar el porcentaje de asfalto el cual pertenece al 5% de volúmenes de vacíos de aire habrá que hacer una interpolación:

$$Pb_{5\% \text{ huecos}} = \left(\frac{5 - Va_{5,5\%}}{Va_{5\%} - Va_{5,5\%}} \times 5\% - 5,5\% \right) + 5,5\%$$

Dónde:

5% y 5,5% : Porcentaje del asfalto

$Va_{5\%}$ y $Va_{5,5\%}$: Volumen de vacíos de aire al 5 y 5,5 % de asfalto

$Va_{5\%}$ = 5,2%

$Va_{5,5\%}$ = 4,3%

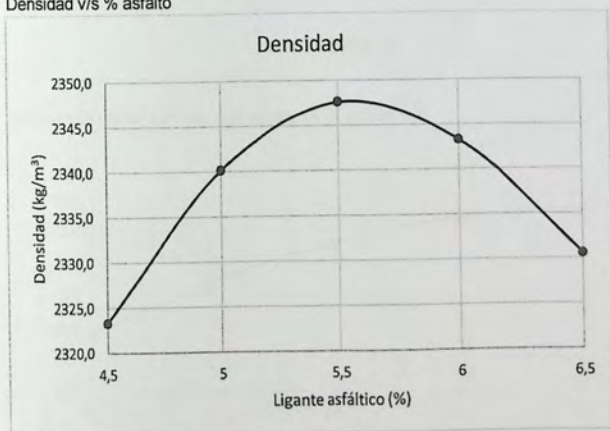
$$Pb_{5\% \text{ huecos}} = \left(\frac{5 - 4,3}{5,2 - 4,3} \times 5\% - 5,5\% \right) + 5,5\%$$

$Pb_{5\% \text{ huecos}}$ = 5,1 % de Asfalto

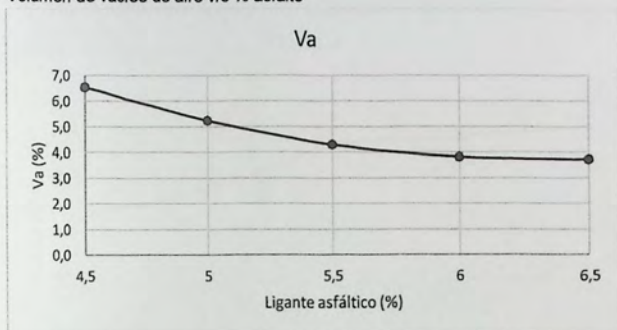
$Pb_{\text{óptimo}}$ = 5,2 ± 0,3 %

2.6 Gráficos de diseño Marshall

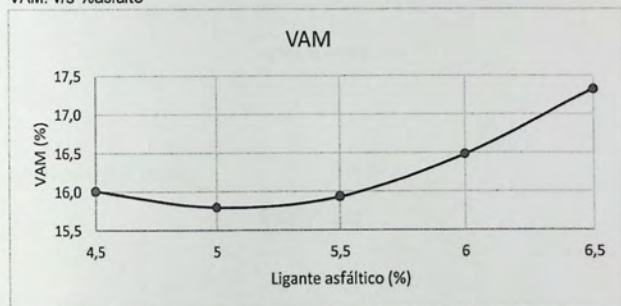
a) Densidad v/s % asfalto



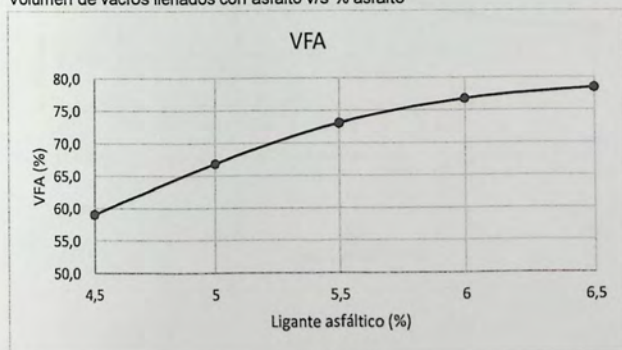
b) Volumen de vacíos de aire v/s % asfalto



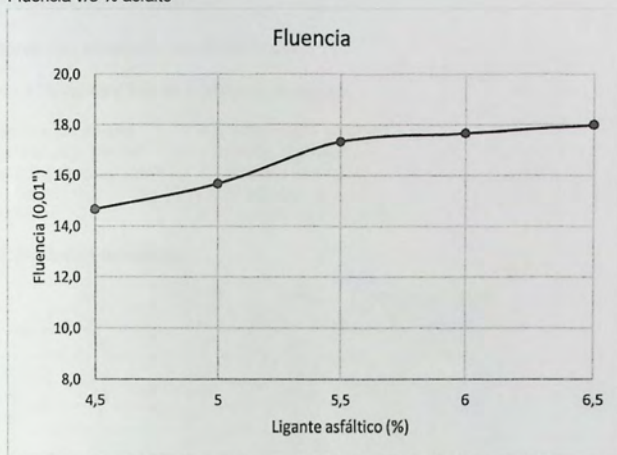
c) VAM. v/s %asfalto



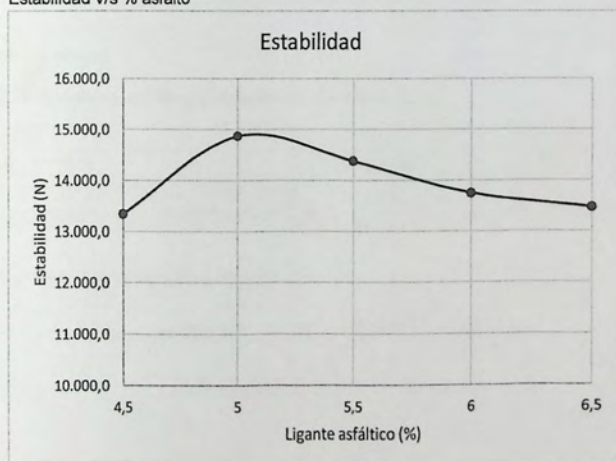
d) Volumen de vacíos llenados con asfalto v/s % asfalto



e) Fluencia v/s % asfalto



f) Estabilidad v/s % asfalto



2.7 Mezcla de trabajo

Es la mezcla que se debería utilizar en terreno.

La banda a utilizar será con las siguientes tolerancias:

Tamiz 5mm o superiores	: ± 5 puntos porcentuales
Tamices 2,5mm y 1,25mm	: ± 4 puntos porcentuales
Tamices 0,63mm y 0,315mm	: ± 3 puntos porcentuales
Tamiz 0,16mm	: ± 2 puntos porcentuales
Tamiz 0,08mm	: ± 1,5 puntos porcentuales

Tabla 2.28- Mezcla de trabajo.

	NCh (mm)	ASTM (inch)	Mezcla % que pasa	Banda de trabajo % que pasa
Tamiz de	19	3/4"	100,0	100
Tamiz de	13	1/2"	86,3	81,3 – 91,3
Tamiz de	10	3/8"	72,8	67,8 – 77,8
Tamiz de	5	N° 4	48,7	43,7 – 53,7
Tamiz de	2,5	N° 8	32,5	28,5 – 36,5
Tamiz de	0,63	N° 30	12,8	9,8 – 15,8
Tamiz de	0,315	N° 50	9,2	6,2 – 12,2
Tamiz de	0,16	N° 100	6,3	4,3 – 8,3
Tamiz de	0,08	N° 200	4,0	2,5 – 5,5

Parámetros a utilizar:

Tabla 2.29- Densidad, asfalto y temperatura a utilizar en obra.

CA-24	%	5,2 ± 0,3
Densidad Marshall	kg/m ³	2346
Rango de temperatura de mezclado en planta	°C	145 - 170
Rango de temperatura de compactación en obra	°C	120 - 160

La densidad Marshall se determina interpolando:

$$Densidad\ Marshall = (2348 - 2340) \times \left(\frac{5,2 - 5,0}{5,5 - 5,0} \right) + 2340$$

$$Densidad\ Marshall = 2343\ (kg/m^3)$$

2.8 Resumen del capítulo

Se ha replicado el diseño de la mezcla asfáltica para la ruta F-62 por el método Marshall obteniendo el porcentaje asfáltico óptimo con su estructura de agregado y sus parámetros el cual consiste en Va, VMA, VFA, Dmm, Densidad, Estabilidad y Fluencia.

Pb óptimo = 5,2 %

Tabla 2.30- Estructura del agregado.

	NCh (mm)	ASTM (inch)	Estructura del agregado % que pasa
Tamiz de	19	3/4"	100,0
Tamiz de	13	1/2"	86,3
Tamiz de	10	3/8"	72,8
Tamiz de	5	N° 4	48,7
Tamiz de	2,5	N° 8	32,5
Tamiz de	0,63	N° 30	12,8
Tamiz de	0,315	N° 50	9,2
Tamiz de	0,16	N° 100	6,3
Tamiz de	0,08	N° 200	4,0

Tabla 2.31- Parámetros Marshall.

Parámetros	Valores obtenidos en este trabajo de título	Rangos permitidos
Asfalto óptimo (%)	5,2%	-
Dmm (kg/m³)	2463	-
Densidad (kg/m³)	2343	-
Va (%)	4,8%	4% - 6%
VAM (%)	15,9%	Mín. 14
VFA (%)	69,4%	-
Fluencia (x 0,01")	16	8 - 16
Estabilidad (N)	14676	Min. 9000

Estos son los valores de los parámetros que se compararon con los del método Superpave.

3 Método Superpave

En 1987, el Strategic Highway Research Program (SHRP) fue establecido por el Congreso de los Estados Unidos con un presupuesto de 150 millones de dólares en programas de investigación, a fin de mejorar el desempeño y duración de las carreteras volviéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores de las mismas. Un tercio de este presupuesto se empleó en el desarrollo de especificaciones de desempeños basados en asfalto, directamente relacionados con análisis de laboratorio y con aplicaciones en terreno. Iniciando el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el producto final del programa es un nuevo sistema llamado Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement). Representa una tecnología provista de tal manera que pueda especificar cemento asfáltico y agregado mineral; desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento. Este método evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (agregado mineral y asfalto), y su interacción cuando están mezclados.

Este método al analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento considera de manera relevante los ejes equivalentes o ESALs (equivalent single axle load), por el cual se elegirá el nivel de diseño a realizar para este método.

3.1 Procedimiento del método Superpave

- 1) Se determina el nivel de diseño para saber cuántos tipos de ensayos se deben realizar.
- 2) Se realizan análisis de los materiales (asfalto y agregado mineral) con su estructura aplicando estándares Superpave.
- 3) Se escoge un ligante asfáltico de prueba que correspondería a un 4% de vacíos de aire de la mezcla y luego se compacta.
- 4) Se realiza una evaluación volumétrica el cual se comparan los volúmenes de vacíos de aire al 4% y volúmenes de vacíos de aire con los datos obtenidos a través del compactador giratorio, en caso de que sean iguales el ligante de prueba sería el ligante asfáltico óptimo a utilizar, caso contrario habría que estimar un porcentaje de ligante asfáltico que en conjunto a los datos obtenidos con el compactador giratorio obtendríamos un 4% de vacíos de aire.
- 5) Se escogen 4 distintas cantidades de ligante asfáltico que varían según el contenido de asfalto al 4% de vacíos de aire y se determina sus parámetros volumétricos.
- 6) Se realizan pruebas de densidad y porción de polvo. Si no cumple se deberá analizar los factores a cambiar y realizar el ensayo nuevamente.
- 7) Se escoge el ligante asfáltico óptimo cumpliendo con los todos los criterios de diseño.

3.2 Niveles de diseño

Antes de replicar el diseño Marshall por el método Superpave se deberá analizar según los ejes equivalentes (ESALs) para ver qué nivel de diseño será utilizado [11].

Los ejes equivalentes (ESALs) es un procedimiento para transformar los diferentes tipos y pesos de ejes que circulan por un camino, a un eje patrón único. El sistema ideado en esa prueba ha demostrado su conveniencia, a tal punto que la mayoría de los métodos y análisis desarrollados con posterioridad han adoptado tanto el concepto como el procedimiento de cálculo.

AASHTO transforma los diferentes ejes que circulan por una ruta, a un eje simple de rueda doble de 80 KN (18 Kips) de peso, considerado como eje patrón. El factor de equivalencia es el cociente que resulta entre el número de ejes de una configuración y peso, necesarios para originar una determinada pérdida de serviciabilidad, respecto del número de ejes patrón requerido para producir la misma pérdida de serviciabilidad; el valor de este cociente es el factor de Ejes Equivalentes.

Se considera un ESALs de 5 millones para la ruta F-62.

Tabla 3.1- Nivel de diseño.

Tránsito ESALs	Niveles de diseño	Requerimientos de ensayo
ESALs $\leq 10^6$	1	Diseño volumétrico
$10^6 < \text{ESALs} \leq 10^7$	2	Diseño volumétrico + ensayos de predicción de la performance.
$10^7 < \text{ESALs}$	3	Diseño volumétrico + aumento de los ensayos de predicción de la performance.

Tras observar la tabla se deberá realizar un nivel de diseño tipo 1 o diseño volumétrico. Los demás niveles son para tránsitos muchos mayores y se necesitará la realización de más ensayos.

3.3 Análisis granulométrico con estándares Superpave

Antes de realizar el diseño volumétrico habrá que hacer un análisis granulométrico con los estándares propuestos por Superpave.

La siguiente tabla muestra la designación Superpave según los tamaños de los áridos, considerando que el tamaño máximo nominal es distinto al tamaño máximo absoluto.

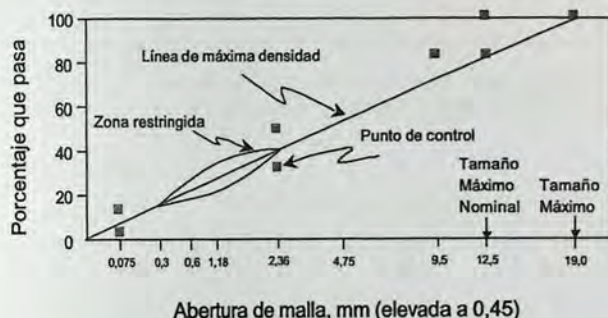
Tabla 3.2- Graduaciones para mezcla Superpave.

Designación Superpave	Tamaño máximo nominal	Tamaño máximo
37,5 mm	37,5	50,0
25,0 mm	25,0	37,5
19,0 mm	19,0	25,0
12,5 mm	12,5	19,0
9,5 mm	9,5	12,5

Superpave ha modificado el enfoque de la granulometría Marshall. Emplea el exponente 0,45 en la banda de granulometría para definir la granulometría permitida (gráfica de Fuller), mediante una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la banda son los porcentajes que pasa del material, en escala aritmética, las abscisas representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0,45 (figura 3.1).

Un diseño de la estructura del agregado que pase entre los puntos de control y evite la zona de restricción, satisface los requerimientos granulométricos de Superpave.

Figura 3.1- Límites para las granulometrías Superpave con un tamaño máximo de 19mm.



Línea de máxima densidad; corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100%, hasta el origen el cual representa una mezcla de agregado muy compacto. Si se tamiza y pasa por la línea de máxima densidad lo único que se dice es que estas partículas están muy compactadas y que podría haber un problema en la colocación del asfalto, ya que habría poco volumen de vacíos de aire.

La zona de restricción ha sido especificada para asegurarse que se desarrolla una adecuada estructura en la mezcla. La zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 o 2.36 mm) y 0.3 mm. Esta zona forma una banda por la cual la curva granulométrica no deberá pasar. Se especifica que las granulometrías deben pasar ya sea abajo o arriba de la zona. Mezclas que pasan por arriba tendrán a ser arenosas y a tener estructuras de agregado débiles en comparación con las que pasan debajo de la zona restringida.

Como se trata de replicar lo hecho por el método Marshall, la siguiente tabla muestra los puntos de control y la zona restringida de la gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 12.5mm.

Tabla 3.3- Especificaciones de la gráfica Fuller para un tamaño máximo nominal de 12,5mm.

Malla (mm)	Puntos de control		Zona restringida	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
19,0		100,0		
12,5	90,0	100,0		
9,5		90,0		
4,75				
2,36	28,0	58,0	39,1	39,1
1,18			25,6	31,6
0,600			19,1	23,1
0,300			15,5	15,5
0,075	2,0	10,0		

La siguiente tabla muestra la granulometría ya obtenida por el método Marshall, al saber esto la idea es replicar la estructura del agregado de diseño, y que cumpla con los parámetros granulométricos Superpave [12].

Tabla 3.4- Granulometría.

Tamiz			Granulometría Propia		
NCh	Gráfico	ASTM	Gravilla 11/17	Gravilla 5/11	Polvo Roca 0/5
(mm)	^0,45	(inch)	% pasa	% pasa	% pasa
50	5,81	2"	-	-	-
40	5,26	1 1/2"	-	-	-
25	4,26	1"	-	-	-
19	3,76	3/4"	100	-	-
12,5	3,12	1/2"	38	100	-
9,5	2,75	3/8"	5	74	100
4,75	2,02	N° 4	4	4	92
2,36	1,47	N° 8	3	2	62
1,18	1,08	N° 16	-	-	-
0,6	0,79	N° 30	-	-	31
0,3	0,58	N° 50	-	-	22
0,15	0,43	N° 100	-	-	16
0,075	0,31	N° 200	2	-	12

3.4 Estructura del agregado de diseño

Antes de calcular un ligante de prueba hay que seleccionar tres tipos de estructuras de agregado para el diseño (mezcla 1, mezcla 2 y mezcla 3) y dos muestras de cada tipo (lote 1 y lote 2). Cada mezcla supone dosificación de áridos de granulometría gruesa, intermedia y fina.

En la figura 3.2 se observa la estructura del agregado de diseño por cantidad de probetas que se debe utilizar.

Figura 3.2- Probetas para la estructura del agregado.



Al estar replicando una dosificación de áridos se utiliza una selección de la estructura del agregado de diseño y dos muestras, las cuales serían las mismas utilizadas en la dosificación en peso de Marshall.

Agregado 3/4" 20%
 Agregado 1/2" 28%
 Polvo Roca 52%

Se tamiza la primera bolsa por el método Superpave, para ver si el porcentaje que pasa está dentro de la Banda Tamiz máximo nominal de 12,5.

Habrà que utilizar dos bolsas de 4500g en este análisis, para tener menos errores asociados a la pérdida de material en el cálculo. El procedimiento para obtener las bolsas aparece en el anexo B el cual considera la reconstitución de agregados.

Tabla 3.5- Mezcla de agregado con sus puntos de control.

Tamiz			Agregado 3/4"	Agregado 1/2"	Polvo Roca	Peso	Mezcla	Puntos de control tamaño máximo nominal	
NCh	Grafico	ASTM	20%	28%	52%			inferior	superior
(mm)	^0,45	(inch)	% pasa	% pasa	% pasa	g	% pasa		
19	3,76	3/4"	100	100	100		100	100	100
12,5	3,12	1/2"	38	100	100	558	88	90	100
9,5	2,75	3/8"	5	74	100	624,6	74	-	-
4,75	2,02	N° 4	4	4	92	1078,2	50	-	-
2,36	1,47	N° 8	3	2	62	736,2	33	28	58
1,18	1,08	N° 16	-	-	-	-	-	-	-
0,6	0,79	N° 30	-	-	31	891,6	13	-	-
0,3	0,58	N° 50	-	-	22	169,2	9	-	-
0,15	0,43	N° 100	-	-	16	130,5	7	-	-
0,075	0,31	N° 200	2	-	12	103,2	4	2	10
Bajo #200			-	-	-	188,1			



En esta gráfica se puede apreciar que la mezcla de agregados no cumple con un punto de control, pero al estar tan cerca del punto de control y a su vez de la línea de tendencia de Fuller, se aceptan estas condiciones de mezcla de agregados para lograr replicar la misma dosificación de áridos.

3.5 Ligante asfáltico de prueba

Para la obtención del porcentaje de asfalto óptimo en el método Superpave, el cual consiste en un método empírico mecanicista, se debe obtener un porcentaje de 4% de vacíos de aire. Para ello hay que estimar un ligante de prueba y someterlo al compactador giratorio hasta obtener el valor real de vacíos de aire de la mezcla. Al saber el porcentaje de vacíos de aire real después de ser compactada la mezcla, se estimará un porcentaje de asfalto óptimo para un 4% de vacíos de aire, luego se compacta y se verifica si es que está al 4% de vacío de aire de esta nueva mezcla.

Para calcular el ligante de prueba debemos obtener:

- Gravedad específica bruta, aparente y efectiva
- Volumen de ligante absorbido y efectivo
- Peso del agregado
- Porcentaje de ligante de prueba

3.5.1 Gravedad específica bruta, aparente y efectiva de los agregados

Para determinar las gravedades específicas se necesitan las densidades de cada material.

Ecuación 3.1- Gravedad específica

$$Ge = \frac{P.E.}{P.E._{agua}}$$

Dónde:

Ge : Gravedad específica
P.E. : Peso específico del material
P.E._{agua} : Peso específico del agua = 1

Sabiendo que:

Ecuación 3.2- Peso específico

$$P.E. = \rho \times g$$

ρ : Densidad
 g : Gravedad

Al reemplazar se puede simplificar la ecuación:

$$Ge = \frac{\rho \times g}{1}$$

Con las propiedades físicas e hidricas ya obtenidas con anterioridad se obtendrán las gravedades específicas.

	Unidades	Gravilla 11/17	Gravilla 5/11	Polvo Roca 0/5
Densidad neta	kg/m ³	2749	2744	2741
Densidad real seca	kg/m ³	2661	2644	2663

Al cambiar de unidades desde el sistema internacional al sistema técnico se podrá decir que:

Densidad neta (kg/m³) = Gravedad específica aparente (kgf/m³)
 Densidad real seca (kg/m³) = Gravedad específica bruta (kgf/m³)

La siguiente tabla muestra la gravedad específica bruta, aparente y dosificación por peso.

Tabla 3.6- Gravedad específica de los agregados.

Agregado	Unidades	Gravilla 11/17	Gravilla 5/11	Polvo Roca 0/5
Gsb por material	kgf/m ³	2661	2644	2663
Gsa por material	kgf/m ³	2749	2744	2741
Dosificación por peso	%	20	28	52

Gsa : Gravedad específica aparente (kgf/m³)

Gsb : Gravedad específica bruta (kgf/m³)

Para determinar el ligante de prueba se tendrá que obtener la gravedad específica de la mezcla.

3.5.1.1 Gravedad específica aparente de la mezcla de los agregados

Ecuación 3.3- gravedad específica aparente de la mezcla de los agregados.

$$Gsa = Gsa_{grav\ 11/17} \times \%Mezcla_{grav\ 11/17} + Gsa_{grav\ 5/11} \times \%Mezcla_{grav\ 5/11} + Gsa_{p.r.} \times \%Mezcla_{p.r.}$$

Gsa : Gravedad específica aparente de la mezcla (kgf/m³)

Gsa_{grav 11/17} : Gravedad específica aparente gravilla 19mm (kgf/m³)

Gsa_{grav 5/11} : Gravedad específica aparente gravilla 12,5mm (kgf/m³)

Gsa_{p.r.} : Gravedad específica aparente polvo roca

%Mezcla_{grav 11/17} : Dosificación gravilla 19mm (%)

%Mezcla_{grav 5/11} : Dosificación gravilla 12,5mm (%)

%Mezcla_{p.r.} : Dosificación polvo roca (%)

$$Gsa = 2749 \times 20 + 2744 \times 28 + 2741 \times 52$$

$$Gsa = 2743 \text{ (kgf/m}^3\text{)}$$

Sabiendo que:

Ecuación 3.2- Peso específico

$$P.E. = \rho \times g$$

ρ : Densidad
 g : Gravedad

Al reemplazar se puede simplificar la ecuación:

$$Ge = \frac{\rho \times g}{1}$$

Con las propiedades físicas e hídricas ya obtenidas con anterioridad se obtendrán las gravedades específicas.

	Unidades	Gravilla 11/17	Gravilla 5/11	Polvo Roca 0/5
Densidad neta	kg/m ³	2749	2744	2741
Densidad real seca	kg/m ³	2661	2644	2663

Al cambiar de unidades desde el sistema internacional al sistema técnico se podrá decir que:

Densidad neta (kg/m³) = Gravedad específica aparente (kgf/m³)
 Densidad real seca (kg/m³) = Gravedad específica bruta (kgf/m³)

La siguiente tabla muestra la gravedad específica bruta, aparente y dosificación por peso.

Tabla 3.6- Gravedad específica de los agregados.

Agregado	Unidades	Gravilla 11/17	Gravilla 5/11	Polvo Roca 0/5
Gsb por material	kgf/m ³	2661	2644	2663
Gsa por material	kgf/m ³	2749	2744	2741
Dosificación por peso	%	20	28	52

Gsa : Gravedad específica aparente (kgf/m³)

Gsb : Gravedad específica bruta (kgf/m³)

Para determinar el ligante de prueba se tendrá que obtener la gravedad específica de la mezcla.

3.5.1.1 Gravedad específica aparente de la mezcla de los agregados

Ecuación 3.3- gravedad específica aparente de la mezcla de los agregados.

$$Gsa = Gsa_{grav\ 11/17} \times \%Mezcla_{grav\ 11/17} + Gsa_{grav\ 5/11} \times \%Mezcla_{grav\ 5/11} + Gsa_{p.r.} \times \%Mezcla_{p.r.}$$

Gsa : Gravedad específica aparente de la mezcla (kgf/m³)

Gsa_{grav 11/17} : Gravedad específica aparente gravilla 19mm (kgf/m³)

Gsa_{grav 5/11} : Gravedad específica aparente gravilla 12,5mm (kgf/m³)

Gsa_{p.r.} : Gravedad específica aparente polvo roca

%Mezcla_{grav 11/17} : Dosificación gravilla 19mm (%)

%Mezcla_{grav 5/11} : Dosificación gravilla 12,5mm (%)

%Mezcla_{p.r.} : Dosificación polvo roca (%)

$$Gsa = 2749 \times 20 + 2744 \times 28 + 2741 \times 22$$

$$Gsa = 2743 \text{ (kgf/m}^3\text{)}$$

3.5.1.2 Gravedad específica bruta de la mezcla de los agregados

Ecuación 3.4- Gravedad específica bruta de la mezcla de los agregados.

$$Gsb = Gsb_{grav\ 19} \times \%Mezcla_{grav\ 19} + Gsb_{grav\ 12,5} \times \%Mezcla_{grav\ 12,5} + Gsb_{p.r.} \times \%Mezcla_{p.r.}$$

Gsb	: Gravedad específica bruta de la mezcla (kgf/m ³)
$Gsb_{grav\ 19}$	: Gravedad específica bruta gravilla 19mm (kgf/m ³)
$Gsb_{grav\ 12,5}$	: Gravedad específica bruta gravilla 12,5mm (kgf/m ³)
$Gsb_{p.r.}$	: Gravedad específica aparente polvo roca
$\%Mezcla_{grav\ 19}$	: Dosificación gravilla 19mm (%)
$\%Mezcla_{grav\ 12,5}$	: Dosificación gravilla 12,5mm (%)
$\%Mezcla_{p.r.}$	: Dosificación polvo roca (%)

$$Gsb = 2661 \times 20 + 2644 \times 28 + 2663 \times 22$$

$$Gsb = 2657 \text{ (kgf/m}^3\text{)}$$

3.5.1.3 Gravedad específica efectiva de los agregados

Ecuación 3.5- Gravedad específica de los agregados.

$$Gse = Gsb + 0,8 \times (Gsa - Gsb)$$

$$Gse = 2657 + 0,8 \times (2743 - 2657)$$

$$Gse = 2726 \text{ (kgf/m}^3\text{)}$$

3.5.2 Volumen de ligante absorbido y efectivo

3.5.2.1 Volumen de ligante absorbido

Ecuación 3.6- Volumen de ligante absorbido.

$$Vba = \frac{Ps \times (1 - Va)}{(Pb/Gb + Ps/Gse)} \times (1/Gsb - 1/Gse)$$

Vba	: Volumen del ligante absorbido (cm ³ /cm ³)
Pb	: Porcentaje de ligante
Ps	: Porcentaje del agregado
Gb	: Gravedad específica del ligante (de peso específico = 1,020 gf/cm ³)
Va	: Volumen de vacíos de aire (cm ³ /cm ³)

Para calcular el ligante de prueba se hacen los siguientes supuestos:

- Porcentaje de ligante a 5%
- Porcentaje de agregado a 95%
- Volumen de vacíos de aire a 4%

Estos valores son irreales, solo son para calcular un ligante de prueba, para compactarlo y ver su comportamiento.

$$V_{ba} = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{(0,05/1020 + 0,95/2726)} \times (1/2657 - 1/2726)$$

$$V_{ba} = 0,022 \text{ (cm}^3/\text{cm}^3\text{)}$$

3.5.2.2 Volumen de ligante efectivo

Ecuación 3.7- Volumen de ligante efectivo.

$$V_{be} = 0,081 - 0,02931 \times \ln(S_n)$$

S_n : Tamaño máximo de la mezcla de agregados (pulgadas)

$$V_{be} = 0,081 - 0,02931 \times \ln(0,75)$$

$$V_{be} = 0,0894 \text{ (cm}^3/\text{cm}^3\text{)}$$

3.5.3 Peso del agregado

Ecuación 3.8- Peso del agregado.

$$W_s = \frac{P_s \times (1 - V_a)}{P_b/G_b + P_s/G_s}$$

Utilizando los mismos supuestos anteriores

$$W_s = \frac{0,95 \times (1 - 0,04)}{0,05/1020 + 0,95/2726}$$

$$W_s = 2296 \text{ (g)}$$

3.5.4 Porcentaje de ligante asfáltico de prueba

Ecuación 3.9- Ligante asfáltico de prueba.

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

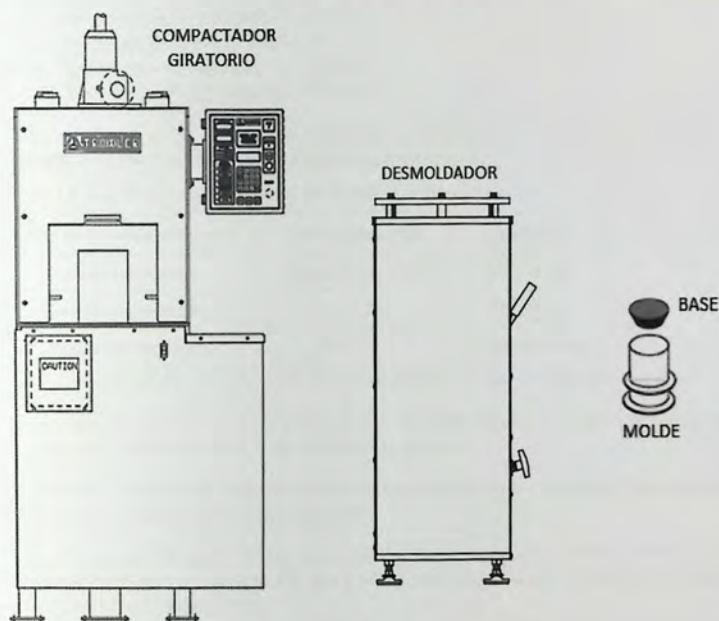
$$P_{bi} = \frac{1020 \times (0,089 + 0,022)}{1020 \times (0,089 + 0,022) + 2296} \times 100$$

$$P_{bi} = 4,71 \text{ (\%)}$$

3.6 Compactador giratorio

El Compactador Giratorio Superpave es un equipo que permite preparar en el laboratorio muestras de mezcla asfáltica en caliente, para que luego sean ensayadas. Posibilita simular la compactación con rodillo que se da en el sitio de pavimentación. En la figura 3.3 se observa el compactador giratorio con sus componentes.

Figura 3.3- Compactador giratorio y sus componentes



3.6.1 Reconstitución Superpave

Para determinar si el porcentaje de asfalto obtenido (Pbi) estaría a un 4% de vacíos, se debe compactar por lo menos dos probetas idénticas. En el anexo B aparece este procedimiento de reconstitución del material por Superpave.

N°bolsas	2
Peso X bolsa (g)	4500

3.6.2 Procedimiento de la compactación [13]

Para confeccionar las probetas primero se prepara la mezcla, luego se compacta y después desmolda. Este proceso se repite para todas las confecciones de probetas necesarias.

3.6.2.1 Preparación de la mezcla

El procedimiento de mezclado es exactamente el mismo que se utiliza en el método Marshall, considerando que:

- Peso dosificación agregado : 4500 g
- Porcentaje de ligante asfáltico : 4,7 %
- Temperatura de mezclado : $156 \pm 3^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de compactación : $147 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Antes de compactar hay que dejar envejeciendo o acondicionando la mezcla en el horno. La siguiente tabla nos muestra los tipos de acondicionamiento.

Tabla 3.7- tipo de acondicionamiento de la mezcla asfáltica [15].

Tipo de acondicionamiento	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo (h)
Diseño de mezcla	Compactación $\pm 3^{\circ}\text{C}$	2 h $\pm$ 5 min
Desempeño corto plazo	$135 \pm 3^{\circ}\text{C}$	4 h $\pm$ 5 min
Desempeño largo plazo*	$85 \pm 3^{\circ}\text{C}$	120 h $\pm$ 30 min

* Este acondicionamiento se aplica luego de que las probetas se han compactado.

En este caso el acondicionamiento a utilizar es el de diseño de mezcla, por lo cual se debe dejar en el horno a temperatura de $156 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por un tiempo de $2 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$.

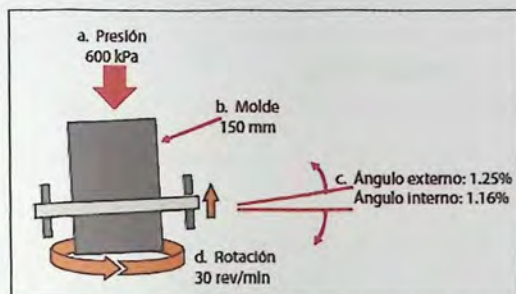
Se dejan acondicionando los instrumentos como la base de molde y el molde, para que no se pierda tanta temperatura al momento de vaciar la mezcla.

Antes de vaciar la mezcla al molde se deben colocar los parámetros de presión, ángulo de giro y cantidad de giros en la unidad de control, que a su vez está conectada a un computador que registra la altura al momento de compactar.

3.6.2.2 Preparación compactador giratorio

El mecanismo de compactación consiste en aplicar una carga de compresión sobre la muestra a compactar, mientras se gira el molde de 150 mm de diámetro con un ángulo de giro de $1,25^{\circ}$ a una velocidad de 30 revoluciones por minuto y a una presión de compactación de $600 \pm 18 \text{ kPa}$ como se puede observar en la figura 3.6. También depende del tránsito, el cual nos daría el número de giros. Este es nuestra única variable para la compactación de mezclas asfálticas. Todos estos valores se deben colocar en la unidad de control.

Figura 3.4- Constantes compactador giratorio.



En esta tabla se observa el número de giros en relación a los millones de ejes equivalentes para el diseño Superpave.

Tabla 3.8- Número de giros a considerar [14].

ESAL's diseño ($\times 10^6$)	N_{ts}	N_{da}	N_{max}
< 0,3	6	50	75
0,3 - < 3	7	75	115
3 - < 30	8	100	160
≥ 30	9	125	205

Al tener un valor de diseño de ESALs igual a 5 millones utilizaremos:

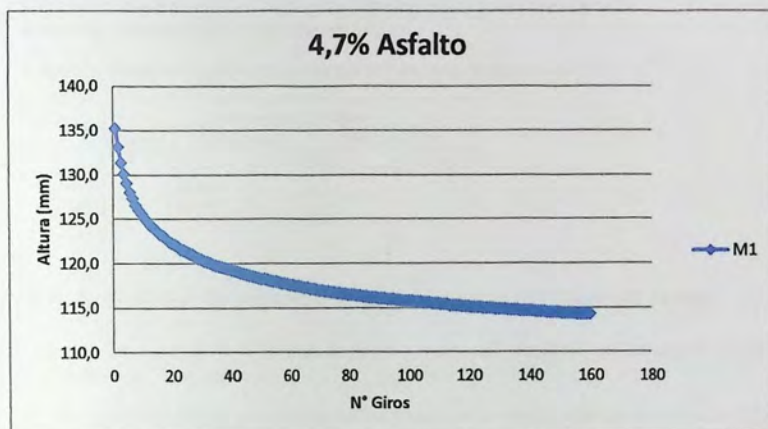
Número de giros iniciales	N_{ini}	8
Número de giros de diseño	N_{dis}	100
Número de giros máximos	$N_{máx}$	160

Tras colocar los valores en la unidad de control, el compactador se conecta al computador, el cual registra la altura de la mezcla al ser compactada por cada número de giros.

3.6.2.3 Compactación de la mezcla

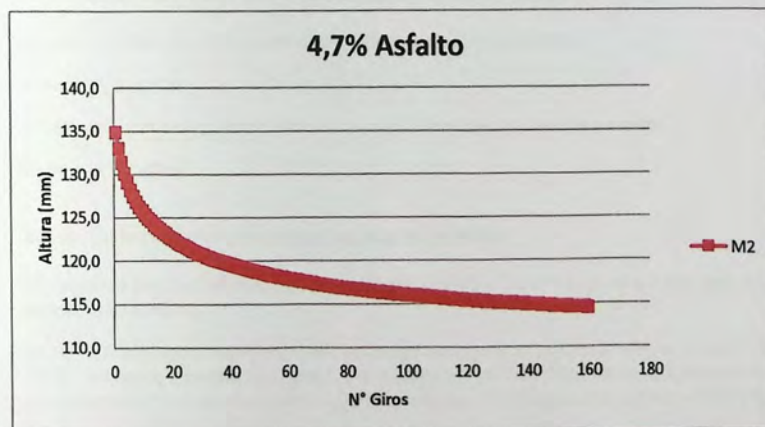
- Pasada las dos horas de acondicionamiento de la mezcla se verifica que todos los instrumentos a utilizar estén a una temperatura adecuada.
- El compactador giratorio debe estar preparado para compactar y registrar todos los datos.
- Se procede a lubricar el molde para que no se adhiera la mezcla.
- Luego se debe verter la mezcla al molde con su base, se coloca un film de papel arriba de la misma, para que al momento de compactar no se pegue a la placa de presión.
- Después se coloca el molde dentro del compactador giratorio, este debe calzar con una guía que tiene el molde con el compactador, se cierra la puerta del compactador y se inicia la compactación.

El siguiente gráfico muestra como el computador va automáticamente registrando los datos y graficando:



Al llegar al número de giros deseado, el compactador se detiene registrando así los valores obtenidos en el computador, luego se procede a sacar el molde del compactador y se enfriará a temperatura ambiente por 24 hr, para luego desmoldar.

Se repite este proceso para la Mezcla 2, el cual se observa en el siguiente gráfico:



3.6.3 Datos obtenidos por el compactador giratorio

En el anexo C se encuentra todos los datos obtenidos por el compactador giratorio al 4,7% de asfalto y los datos relevantes están en la tabla siguiente.

Tabla 3.9- Datos relevantes obtenidos por el compactador giratorio.

N° Giros	Altura de la probeta		
	Mezcla 1	Mezcla 2	PROM 4,7%
8	126,6	126,8	126,7
100	115,8	116,0	115,9
160	114,3	114,5	114,4

3.7 Aplicación de resultados para obtener volúmenes reales

Obtenidas las alturas de giros iniciales, de diseño y máximo se puede obtener los valores reales de volúmenes al 4,7% de asfalto.

Es necesario determinar la gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica compactada (Gmm) y su gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada (Gmb) para obtener los volúmenes reales al 4,7% de asfalto.

En AASHTO [15] indica el procedimiento para la obtención de volúmenes reales.

3.7.1 Gmm teórico según el porcentaje asfalto de prueba

Se calcula el Dmm según la ecuación 2.11 considerando 4,7% de asfalto.

$$Dmm = 2479 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

El valor del Gmm tiene el mismo valor numérico del Dmm pero en distintas unidades.

$$Gmm = 2479 \text{ (kgf/m}^3\text{)}$$

3.7.2 Gmb según el porcentaje asfalto de prueba

Se calcula la densidad de la probeta para determinar Gmb a 160 giros, ya que a ese giro queda compactada la probeta.

Gmb : Es la gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada, la cual se determina a través de los parámetros obtenidos por el compactador giratorio. Para interpretar los resultados obtenidos por el compactador giratorio se determina Gmb compactada al número de giros máximos (160 giros).

Con la conversión de unidades se obtendrá:

Gravedad específica de la mezcla compactada (Gmb) = Densidad de la mezcla compactada

3.7.2.1 Densidad de la mezcla

Para determinar la densidad de la mezcla al menos se debe realizar el ensayo con 2 probetas. En este caso se utilizó una balanza que debe soportar por lo menos 5000 g y se equipó con un aparato de suspensión el cual estuvo sumergido bajo agua para pesar la muestra sumergida.

Se determinó:

- Peso seco
- Peso bajo agua
- Peso superficialmente seco
- Absorción de agua
- Densidad real seca

Se utilizó las ecuaciones 2.9 y 2.10 para obtener la absorción y densidad de las probetas.

Tabla 3.10- Densidad y absorción para un 4,7% de asfalto.

	Determinación de la Absorción de agua y Densidad de las Briquetas					
	Pesos (g)			Absorción de agua (%)	Densidad (kg/m ³)	Densidad promedio (kg/m ³)
	Seco	Bajo agua	PSS			
Muestra 1	4662,0	2676,0	4687,0	1,243	2318,2	2331,3
Muestra 2	4670,0	2711,0	4703,0	1,657	2344,4	

$$Gmb = 2331 \text{ (kgf/m}^3\text{)}$$

3.7.2.2 Gravedad específica de la mezcla compactada a número de giros de diseño

$Gmb(\text{diseño})$: Es la gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada a número de giros de diseño (100 giros).

Se sabe que Gmb calculada está compactada a 160 giros, para poder determinar a 100 giros se utilizará la siguiente ecuación:

Ecuación 3.10- Gravedad específica de la mezcla compactada.

$$Gmb = \frac{P}{\pi \times R^2 \times H}$$

Dónde:

P : Peso
R : Radio
H : Altura

Para 100 números de giros se despejan las constantes y se igualan las ecuaciones:

$$\text{Ecuación 3.10 a 160 giros: } Gmb_{160} \times H_{160} = P / (\pi \times R^2)$$

$$\text{Ecuación 3.10 a 100 giros: } Gmb_{100} \times H_{100} = P / (\pi \times R^2)$$

$$\text{De las 2 últimas ecuaciones se obtiene: } Gmb_{160} \times H_{160} = Gmb_{100} \times H_{100}$$

Dónde:

H_{160} : Altura de la probeta a 160 giros

H_{100} : Altura de la probeta a 100 giros

Gmb_{160} : Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada a 160 giros

Gmb_{100} : Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada a 100 giros

Observando los datos que se obtienen en el compactador giratorio

$$Gmb_{100} = \frac{Gmb_{160} \times H_{160}}{H_{100}}$$

Sabiendo que:

$H_{160} = 114,4$ (cm)

$H_{100} = 115,9$ (cm)

$Gmb_{160} = 2331$ (kgf/m³)

$$Gmb_{100} = \frac{2331 \times 114,4}{115,9}$$

$$Gmb_{100} = 2301 \text{ (kgf/m}^3\text{)}$$

3.7.3 Cálculo de Va y VAM al porcentaje de asfalto de prueba

Los vacíos de aire de la probeta (V_a) deben dar 4% para que el porcentaje de asfalto de la prueba sea óptimo. Con la siguiente ecuación se determinará V_a :

Ecuación 3.11- Volumen de vacíos real al porcentaje de asfalto de prueba.

$$V_a = 100 \times \left(1 - \frac{Gmb_{100} \times F.C.}{Gmm} \right)$$

Dónde:

Gmb_{100} : Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada a 100 giros

Gmm : Gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica

F.C. : Factor de corrección = 1,022

(Es incluido solo cuando hay valores del compactador giratorio).

$$V_a = 100 \times \left(1 - \frac{2301 \times 1,022}{2479} \right)$$

$$V_a = 5,14 \%$$

Al no cumplir con el 4% de vacíos de aire del asfalto de prueba, no sirve como ligante óptimo, por lo cual se estimará un nuevo asfalto óptimo.

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) para el ligante de prueba:

Ecuación 3.12- Volumen de vacíos en el agregado mineral al porcentaje de asfalto de prueba.

$$VAM = 100 \times \left(1 - \frac{Gmb_{100} \times F.C. \times Ps}{Gsb} \right)$$

Dónde:

Gmb_{100} : Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada a 100 giros

Ps : Porcentaje del agregado

Gsb : Gravedad específica bruta

$F.C.$: Factor de corrección = 1,022

(Es incluido solo cuando hay valores del compactador giratorio).

$$VAM = 100 \times \left(1 - \frac{2301 \times 1,022 \times 0,956}{2657} \right)$$

$$VAM = 15,39 \%$$

3.8 Asfalto óptimo estimado

El asfalto óptimo estimado es el asfalto a un 4% de vacíos de aire usando parámetros entregados por el compactador giratorio. Además el asfalto óptimo estimado debe cumplir varios parámetros para considerarlo óptimo.

3.8.1 Asfalto óptimo estimado

El asfalto óptimo estimado es calculado de la siguiente manera:

Ecuación 3.13- Asfalto óptimo estimado.

$$Pb_{est} = Pb_l - 0,4 \times (4 - Va_l)$$

Dónde:

Pb_{est} : Asfalto óptimo estimado

Pb_l : Asfalto de prueba

Va_l : Volumen de vacíos de aire de prueba

$$Pb_{est} = 4,7 - 0,4 \times (4 - 5,14)$$

$$Pb_{est} = 5,2 (\%)$$

3.8.2 Volumen de vacíos en el agregado mineral estimado

Es una propiedad volumétrica estimada, la cual se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 3.14- Volumen de vacíos en el agregado mineral estimado

$$VAM_{est} = VAM_l + C \times (4 - Va_l)$$

Dónde:

- VAM_{est} : Volumen de vacíos en el agregado mineral estimado
 VAM_i : Volumen de vacíos en el agregado mineral del asfalto de prueba
 C : Constante si $Va < 4\% = 0,1$ y si $Va > 4\% = 0,2$
 Va_i : Vacíos de aire del asfalto de prueba

$$VAM_{est} = 15,39 + 5,14 \times (4 - 5,14)$$

$$VAM_{est} = 15,2 (\%)$$

3.8.3 VFA estimado

Propiedad volumétrica estimada, la cual se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 3.15- Volumen de vacíos llenados con asfalto estimado.

$$VFA_{est} = 100 \times [(VAM_{est} - 4)/VAM_{est}]$$

Dónde:

- VFA_{est} : Volumen de vacíos llenados con asfalto
 VAM_{est} : Volumen de vacíos en el agregado mineral estimado

$$VFA_{est} = 100 \times [(15,2 - 4)/15,2]$$

$$VFA_{est} = 73,6 (\%)$$

3.8.4 Porcentaje de gravedad específica máxima a giro inicial estimado

Ecuación 3.16- porcentaje de gravedad específica máxima a giro inicial estimado.

$$\%Gmm(ini)_{est} = 100 \times \frac{Gmb(diseño)_i \times F.C. \times H(diseño)_i}{Gmm_i \times H(inicial)_i} - 4 + Va_i$$

Dónde:

- $\%Gmm(ini)_{est}$: Porcentaje gravedad específica máxima a giro inicial de diseño estimado (%)
 $Gmb(diseño)_i$: Gravedad específica de la mezcla compactada a giro de diseño del Pbi (kgf/m^3)
 Gmm_i : Gravedad específica máxima de la mezcla del Pbi (kgf/m^3)
 Va_i : Volumen de vacíos de aire del Pbi (%)
 $F.C.$: Factor de corrección 1,022
 $H(inicial)_i$: Altura de la probeta compactada a giro inicial del Pbi (mm)
 $H(diseño)_i$: Altura de la probeta compactada a giro de diseño del Pbi (mm)
 Pbi : Asfalto de prueba (4,7%)

$$\%Gmm(ini)_{est} = 100 \times \frac{2301 \times 1,022 \times 115,9}{2479 \times 126,7} - 4 + 5,14$$

$$\%Gmm(ini)_{est} = 87,9 (\%)$$

3.8.5 Porcentaje de gravedad específica máxima a giro de diseño estimado

Ecuación 3.17- porcentaje de gravedad específica máxima a giro de diseño estimado.

$$\%Gmm(max)_{est} = 100 \times \frac{Gmb(diseño)_i \times F.C. \times H(diseño)_i}{Gmm_i \times H(max)_i} - 4 + Va_i$$

Dónde:

- $\%Gmm(max)_{est}$: Porcentaje gravedad específica máxima a giro máximo estimado (%)
- $Gmb(diseño)_i$: Gravedad específica de la mezcla compactada a giro de diseño del Pbi (kgf/m³)
- Gmm_i : Gravedad específica máxima de la mezcla del Pbi (kgf/m³)
- Va_i : Volumen de vacíos de aire del Pbi (%)
- $F.C.$: Factor de corrección 1,022
- $H(max)_i$: Altura de la probeta compactada a giro máximo del Pbi (mm)
- $H(diseño)_i$: Altura de la probeta compactada a giro de diseño del Pbi (mm)
- Pbi : Asfalto de prueba (4,7%)

$$\%Gmm(ini)_{est} = 100 \times \frac{2301 \times 1,022 \times 115,9}{2479 \times 114,4} - 4 + 5,14$$

$$\%Gmm(ini)_{est} = 97,2 (\%)$$

3.8.6 Asfalto efectivo estimado

Ecuación 3.18- Asfalto efectivo estimado.

$$Pbe_{est} = Pb_{est} - Ps \times Gb \times \left(\frac{Gse - Gsb}{Gse \times Gsb} \right)$$

Dónde:

- Pbe_{est} : Asfalto efectivo estimado (%)
- Pb_{est} : Asfalto óptimo estimado (%)
- Ps : Porcentaje del agregado (%)
- Gb : Gravedad específica del ligante (de peso específico = 1,020 gf/cm³)
- Gse : Gravedad específica efectiva de la mezcla (gf/cm³)
- Gsb : Gravedad específica bruta de la mezcla (gf/cm³)

$$Pbe_{est} = 5,2 - 95,6 \times 1,02 \times \left(\frac{2,726 - 2,657}{2,726 \times 2,657} \right)$$

$$Pbe_{est} = 4,2 (\%)$$

3.8.7 Porción de polvo estimado

Ecuación 3.19- Porción de polvo estimado.

$$PP = P_{0,075} / P_{be_{est}}$$

Dónde:

PP : Porción de polvo

P_{0,075} : Porcentaje que pasa el 0,075 mm de tamiz (%)

P_{be_{est}} : Asfalto efectivo estimado (%)

$$PP = 4,2 / 4,2$$

$$PP = 1,00$$

3.8.8 Resumen de valores estimados

La siguiente tabla que muestra el resumen de valores estimados y si se cumple con los parámetros mínimos y máximos [12].

Tabla 3.11- Datos estimados al 4% de vacíos de aire.

P _{best}	5,16	
%VAM est	15,2	OK
%VFA est	73,6	OK
%Gmm (ini) est	87,9	OK
%Gmm (max) est	97,2	OK
P _{be est}	4,2	
P _{0,0075}	4,2	
PP	1,1	OK

Límites de valores estimados:

- %VAM

Tabla 3.12- Mínimo %VAM.

Tamiz máximo nominal	%
9.5mm	15
12.5mm	14
19.0mm	13
25.0mm	12
37.5mm	11

- %VFA

Tabla 3.13- Parámetros del %VFA.

ESALs (millones)	Min (%)	Max (%)
<0.3	70	80
0.3 to <3	65	78
3 to 10	65	75
10 to <30	65	75
>30	65	75

Considerar que:

- (1) Para los 25,0 mm de tamiz máximo nominal, el VFA Min será el 67% de los niveles de tráfico de diseño <0,3 millones.
- (2) En el caso de 9,5 mm de tamiz máximo nominal, el rango será 73% al 76% para 3 millones + ESALs.
- (3) Para los 37,5 mm de tamiz máximo nominal, el VFA Min será 64% para todos los niveles de tráfico de diseño.

- %Gmm(ini) y %Gmm(max)

Tabla 3.14- Densidad relativa requerida.

ESAL's diseño (x10 ⁶)	Densidad relativa requerida (G _{mm})		
	N _{ini}	N _{dis}	N _{max}
< 0,3	≤ 91,5 %	96,0 %	98,0 %
0,3 - < 3	≤ 90,5 %		
3 - < 30	≤ 89,0 %		
≥ 30			

En esta tabla se escogió un $N_{ini} \leq 89,0\%$

- Porción de polvo

Tabla 3.15- Parámetros de porción de polvo.

min	0,6
max	1,2

Tras cumplir con todos los parámetros considerados, el asfalto óptimo se estimó en 5,2%.

3.9 Selección del porcentaje de ligante asfalto óptimo de diseño

Una vez que se selecciona la estructura del agregado de diseño se debe compactar a distinto contenido de asfalto para obtener así las propiedades de la mezcla, evaluarlas y determinar su contenido de asfalto óptimo real.

Se utilizó cuatro tipos de ligante asfáltico y se hizo un mínimo de dos probetas por cada contenido de asfalto.

Selección del Asfalto de diseño	
% Asfalto óptimo estimado -0,5%	4,7
% Asfalto óptimo estimado	5,2
% Asfalto óptimo estimado +0,5%	5,7
% Asfalto óptimo estimado -1,0%	6,2

3.9.1 Reconstitución Superpave

Se deben realizar ocho probetas en total como se muestra en la figura 3.7.

Figura 3.5- Porcentaje de asfalto de diseño.



Para realizar la reconstitución de los agregados, se utilizó solo seis probetas ya que anteriormente ya se realizó una compactación del porcentaje de ligante asfáltico a 4,7% con dos probetas.

Se deben compactar por lo menos dos probetas idénticas por cada porcentaje de asfalto.

Nºbolsas	6
Peso X bolsa (g)	4500

3.9.2 Procedimiento de compactación

Se realiza igual que el punto 2.4.3 (confección de probetas), pero en este caso se hicieron seis mezclas con distinto contenido de asfalto para compactar. Estas probetas fueron usadas en la determinación de las densidades.

3.9.3 Densidades

Luego de haber compactado, se determinarán las densidades de todas las probetas para poder calcular G_{mb} y así el $\%G_{mm}$ de cada giro.

Tabla 3.16- Densidades a distintos porcentajes de asfalto.

Confección de Briquetas		Determinación de la Absorción de agua y Densidad de las Briquetas					Promedio
Mezclas	% Asfalto	Pesos (gr)			Absorción Agua (%)	Densidad (kg/m ³)	Densidad (kg/m ³)
		Seco	Bajo agua	PSS			
Punto 1	4,7	4662,0	2676,0	4687,0	1,243	2318,2	2331,3
		4670,0	2711,0	4703,0	1,657	2344,4	
Punto 2	5,2	4705,0	2704,0	4709,0	0,200	2346,6	2345,3
		4709,0	2707,0	4716,0	0,348	2344,0	
Punto 3	5,7	4706,0	2706,0	4721,0	0,744	2335,5	2338,4
		4706,0	2708,0	4718,0	0,597	2341,3	
Punto 4	6,2	4709,0	2684,0	4722,0	0,638	2310,6	2328,7
		4724,0	2738,0	4751,0	1,341	2346,7	

3.9.4 Porcentaje de la gravedad específica máxima de la mezcla compactada

Para determinar $\%G_{mm}$ se debe determinar G_{mb_n} . En ambas variables están en función a n número de giros.

La gravedad específica de la mezcla compactada a 160 giros (G_{mb}) es equivalente a la densidad. Para determinarla en función a n giros se utiliza la ecuación 3.10.

$$G_{mb_n} = \frac{G_{mb} \times H_{160}}{H_n}$$

Dónde:

H_{160} : Altura compactada de la probeta a 160 giros

H_n : Altura de la probeta a n número de giros

G_{mb} : Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada a 160 giros

G_{mb_n} : Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada a n número de giros

Donde G_{mb} y H_{160} son constantes para el mismo porcentaje de asfalto.

3.9.5 Cálculo de %Gmm para cada giro

Para el cálculo de %Gmm_n se debe utilizar la ecuación 3.20 pero en función a n número de giros. Para poder obtener valores reales no se deben considerar los volúmenes de vacíos de aire ya que daría un valor estimado al 4% de vacío en altura de diseño.

Ecuación 3.20- porcentaje de gravedad específica máxima compactada a n número de giros.

$$\%Gmm_n = 100 \times \frac{Gmb(diseño) \times F.C. \times H(diseño)}{Gmm \times H_n}$$

Dónde:

- %Gmm_n : Porcentaje gravedad específica máxima a giro n
Gmb(diseño) : Gravedad específica de la mezcla compactada a giro de diseño
Gmm : Gravedad específica máxima de la mezcla
F. C. : Factor de corrección 1,022
H_n : Altura de la probeta compactada a giro n
H(diseño) : Altura de la probeta compactada a giro de diseño

Otra manera de determinar el %Gmm_n se encuentra en el anexo D.

En anexo E se encuentra las tablas con los parámetros Gmb_n y %Gmm_n para todos los giros realizados por cada distinta cantidad de asfalto y su gráfico respectivo.

3.9.5.1 Ligante asfáltico 4,7%

Las constantes para esta cantidad de ligante son:

- H₁₆₀ = 114,4 (cm)
Gmb = 2331 (kgf/m³)
Gmm = 2479 (kgf/m³)

Aplicando la ecuación 3.20 se determinaron los valores relevantes los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.17- %Gmm para los giros 8, 100 y 160 con un 4,7% de asfalto

Valores de compactación	
% Gmm @ N=8	86,8%
% Gmm @ N=100	94,9%
% Gmm @ N=160	96,1%

3.9.5.2 Ligante asfáltico 5,2%

Las constantes para esta cantidad de ligante son:

- H₁₆₀ = 113,9 (cm)
Gmb = 2345 (kgf/m³)
Gmm = 2463 (kgf/m³)

Aplicando la ecuación 3.20 se determinaron los valores relevantes los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.18- %Gmm para los giros 8, 100 y 160 con un 5,2% de asfalto

Valores de compactación	
% Gmm @ N=8	87,2%
% Gmm @ N=100	96,0%
% Gmm @ N=160	97,3%

3.9.5.3 Ligante asfáltico 5,7%

Las constantes para esta cantidad de ligante son:

$$\begin{aligned}
 H_{160} &= 114,6 \text{ (cm)} \\
 Gmb &= 2338 \text{ (kgf/m}^3\text{)} \\
 Gmm &= 2446 \text{ (kgf/m}^3\text{)}
 \end{aligned}$$

Aplicando la ecuación 3.20 se determinaron los valores relevantes los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.19- %Gmm para los giros 8, 100 y 160 con un 5,7% de asfalto

Valores de compactación	
% Gmm @ N=8	87,7%
% Gmm @ N=100	96,4%
% Gmm @ N=160	97,7%

3.9.5.4 Ligante asfáltico 6,2%

Las constantes para esta cantidad de ligante son:

$$\begin{aligned}
 H_{160} &= 113,9 \text{ (cm)} \\
 Gmb &= 2329 \text{ (kgf/m}^3\text{)} \\
 Gmm &= 2430 \text{ (kgf/m}^3\text{)}
 \end{aligned}$$

Aplicando la ecuación 3.20 se determinaron los valores relevantes los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.20- %Gmm para los giros 8, 100 y 160 con un 6,2% de asfalto

Valores de compactación	
% Gmm @ N=8	87,6%
% Gmm @ N=100	96,6%
% Gmm @ N=160	97,9%

3.9.6 Resumen de datos

Las propiedades de la mezcla son evaluadas en parámetros de compactación y en parámetros volumétricos.

3.9.6.1 Parámetros de compactación

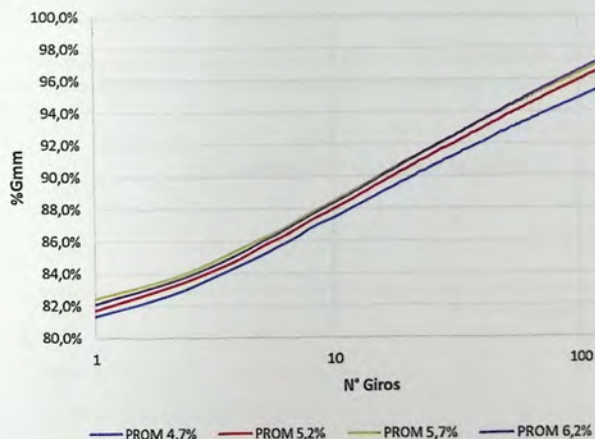
Los parámetros de compactación corresponden a la densificación de giros iniciales, de diseño y máximos para distintas cantidades de asfalto.

Tabla 3.21- Propiedades de compactación.

Propiedades de Compactación				
% asfalto	4,7%	5,2%	5,7%	6,2%
Gmm	2479,3	2462,5	2446,2	2430,2
% Gmm @ N=8	86,8%	87,2%	87,7%	87,6%
% Gmm @ N=100	94,9%	96,0%	96,4%	96,6%
% Gmm @ N=160	96,1%	97,3%	97,7%	97,9%

En el siguiente grafico se ven representados las curvas de dosificación promedio por cada giro.

Curvas de dosificación promedio



3.9.6.2 Parámetros volumétricos

Para calcular los parámetros volumétricos se utilizó las ecuaciones 3.11 y 3.12 para obtener Va y VAM. Para obtener VFA se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 3.21- Volúmenes de vacíos llenados con asfalto.

$$VFA = 100 \times \frac{VAM - Va}{VAM} (\%)$$

Donde:

VAM : Volumen de vacíos en el agregado mineral (%)

Va : Volumen de vacíos de aire (%)

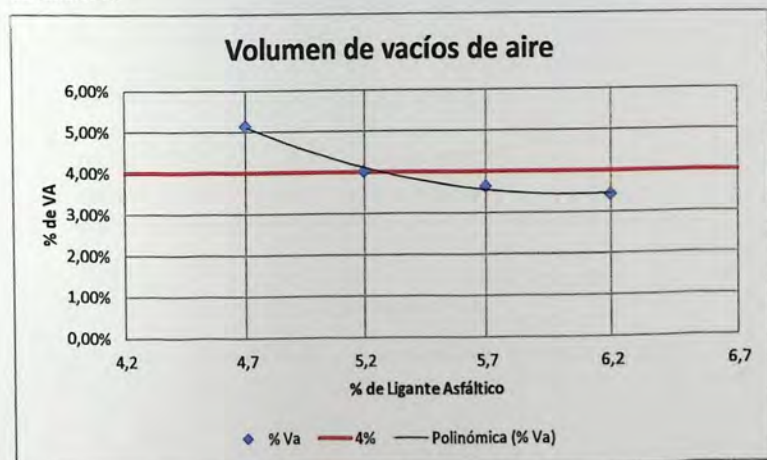
Tabla 3.22- Propiedades volumétricas.

Propiedades Volumétricas				
% ligante asfáltico	4,7%	5,2%	5,7%	6,2%
% Va	5,14%	4,03%	3,65%	3,43%
% VMA	15,4%	15,0%	15,2%	15,6%
% VFA	67%	73%	76%	78%
Densidades (kg/m ³) o Gmb (kgf/m ³)	2331	2345	2338	2329

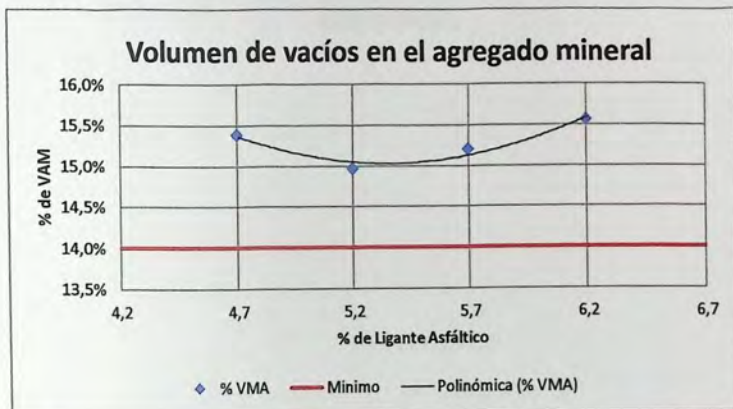
Si bien el límite de volúmenes de vacíos de aire es de 4%, al tener un valor 0,03% mayor no influiría en la obtención del ligante asfáltico óptimo ya que la diferencia sería muy baja.

Cada gráfico mostrará sus limitaciones y su línea de tendencia polinómica [15].

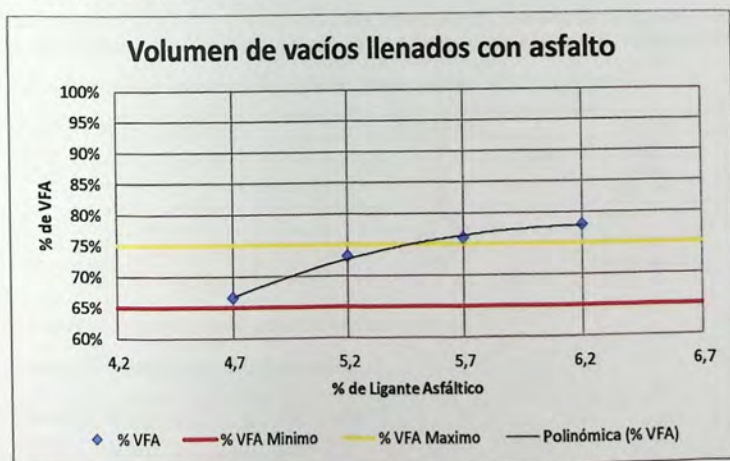
En el siguiente gráfico se observa los datos obtenidos de volúmenes de vacíos de aire por cada porcentaje de ligante asfáltico en el método Superpave además de su límite de 4% de Va y su línea de tendencia.



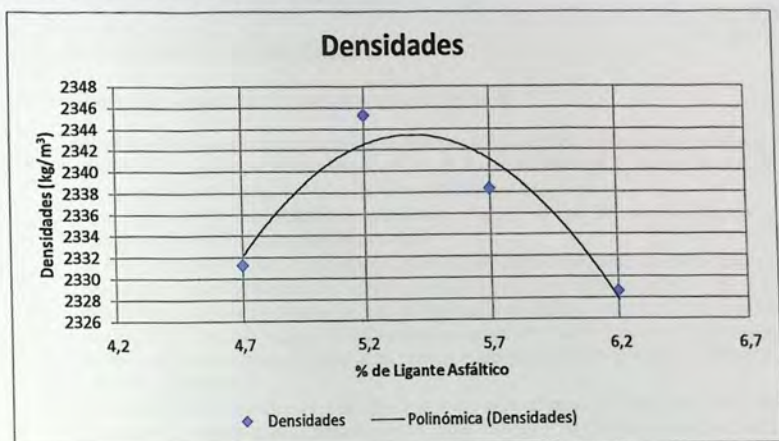
En el siguiente gráfico se observa los datos obtenidos de volumen de vacíos en el agregado mineral por cada porcentaje de ligante asfáltico en el método Superpave además de su límite de 14% de VAM y su línea de tendencia.



En el siguiente gráfico se observa los datos obtenidos de volumen de vacíos llenados con asfalto por cada porcentaje de ligante asfáltico en el método Superpave además de sus límites que varía entre 65% a un 75% de VFA y su línea de tendencia.



En el siguiente gráfico se observa las densidades por cada porcentaje de ligante asfáltico en el método Superpave y su línea de tendencia.



3.10 Asfalto óptimo de diseño

El volumen de vacíos de aire real es de 4,03%, aproximándolo a un 4%. En la siguiente tabla se pueden observar las propiedades de la mezcla con 5,2% de ligante asfáltico y su criterio de diseño.

Tabla 3.23- Propiedades de la mezcla con 5,2% de asfalto.

Propiedades de la mezcla	Resultado	Criterio
% Va	4,0%	4,0%
% VMA	15%	14%
% VFA	73%	65%-75%
Porción de Polvo	1,00%	0,6% - 1,2%
%Gmm(ini)	87%	menos de 89%
%Gmm(max)	97%	menos de 98%

La siguiente tabla muestra las propiedades de compactación

Tabla 3.24- Propiedades de compactación.

Densidad efectiva	2658	kg/m ³
Densidad asfalto	1020	kg/m ³
Gmm	2463	kg/l/m ³
Gmb	2345	kg/l/m ³

4 Análisis de resultados

4.1 Comparación del proceso

Se destacan las siguientes observaciones en el proceso de diseño:

- El método Marshall no considera el tránsito vehicular (ESALS) para su diseño, por el contrario el método Superpave sí lo hace, éste factor es relevante para su diseño, calcula 3 niveles de diseño además de ajustar sus parámetros volumétricos éste factor.
- Para la creación de las probetas se necesitaron 1100g en el caso del método Marshall y 4500g para el método Superpave (figura 4.1).
- El método Marshall utiliza 2 maquinarias para obtener una dosificación óptima de diseño, una es el compactado Marshall el cual compacta las mezcla para dejar probetas de 100 mm de diámetro y la otra maquinaria es para determinar la estabilidad y fluencia de la mezcla comparada. El método Superpave sólo utiliza una maquinaria para obtener la dosificación óptima de diseño, el compactado giratorio, el cual compacta la mezcla dejando probetas de 150 mm de diámetro.
- Para determinar la estructura del agregado pétreo el método Superpave utiliza tres tipos de mezclas de agregado (fino, intermedio y grueso) que debe cumplir con sus puntos de control y zona de restricción, además de la porción de polvo. El método Marshall utiliza sólo los puntos de control como restricción para obtener la estructura de agregado pétreo.
- La realización de la mezcla fue igual en ambos métodos.
- Para la determinación del ligante asfáltico óptimo, el método Superpave manifiesta que se debe escoger un ligante asfáltico de manera que el volumen de vacío de aire sea igual a 4%. Por otro lado el ligante asfáltico óptimo del método Marshall fue determinado promediando el ligante asfáltico que tenga la densidad más alta, mejor estabilidad y al 5% de volumen de vacíos de aire.
- La compactación en el método Superpave se realizó varias veces para obtener el ligante asfáltico óptimo para un 4% de volumen de vacíos de aire y se compactó en 4 distintas cantidades de asfalto (asf. op - 0,5%; asf. op; asf. op + 0,5% y asf. op + 1,0%) para así evaluar sus parámetros más relevantes (Va, VAM, VFA, Dmm, Densidad, %Gmm(ini), %Gmm(max) y Porción de polvo). El método Marshall la compactación se realizó para 5 distintos contenidos de asfalto (4,5%; 5,0%; 5,5%; 6,0% y 6,5%) para luego evaluar sus parámetros más relevantes (Va, VAM, VFA, Dmm, Densidad, Estabilidad y fluencia).
- La determinación de las densidades se realizó de la misma manera en ambos métodos.

Figura 4.1- Probetas de mezclas asfálticas.



Tabla 4.1- Resumen de la comparación entre los métodos Marshall y Superpave.

Comparación	Método Marshall	Método Superpave
Tipos de ensayos relacionados con los ESALS	Se realiza el ensayo de diseño por el método Marshall independiente del tránsito vehicular	Existen 3 tipos de ensayos para distintos tránsitos vehiculares
Material de agregados pétreos para la confección de las probetas	1100 g	4500 g
Selección de la estructura de agregado	Se determina a través de los puntos de control especificada de la banda granulometría de diseño	Se determina a través de la selección entre 3 distintas estructuras de agregado (fina, intermedia y gruesa) el cual cumpla con los puntos de control además de su zona de restricción y porción de polvo
Puntos de análisis	Se analizan 5 distintas cantidades de asfalto: • 4,5% • 5,0% • 5,5% • 6,0% • 6,5%	Se analizan 4 distinta cantidades de asfalto: • asf. op - 0,5% • asf. op • asf. op + 0,5% • asf. op +1,0%
Proceso de mezclado	Se realiza de la misma manera para ambos métodos	
Maquinarias a utilizar para la dosificación	Compactado Marshall y máquina de estabilidad y fluencia	Compactado giratorio
Probetas obtenidas	100 mm de diámetro	150 mm de diámetro
Densidad	Se realiza el mismo ensayo para ambos métodos	
Parámetros a considerar para la dosificación óptima de la mezcla	Va, VAM, VFA, Densidad, Dmm, Estabilidad y Fluencia	Va, VAM, VFA, Dmm, Densidad, porción de polvo, %Gmm(ini) y %Gmm(max)
Obtención del ligante asfáltico óptimo	Se determina promediando el ligante asfáltico que tenga la densidad más alta, mejor estabilidad y al 5% de volumen de vacíos de aire.	Se determina escogiendo un ligante asfáltico con un Va igual a un 4%

4.2 Comparación de resultados

Se compararon los parámetros de la empresa proveedora, los obtenidos por el método Marshall y los obtenidos a través del método Superpave además de los rangos permitidos para este diseño.

4.2.1 Comparación de las mezclas de diseño

Tabla 4.2.- Comparación de resultados.

Parámetros	Rangos permitidos	Empresa Proveedora	Valores obtenidos en este trabajo de título		Rangos permitidos
	Método Marshall	Método Marshall	Método Marshall	Método Superpave	Método Superpave
Asfalto óptimo (%)	-	5,2%	5,2%	5,2%	-
Dmm (kg/m ³)	-	2463	2463	2463	-
Densidad (kg/m ³)	-	2337	2343	2345	-
Va (%)	4% - 6%	5,1%	4,8%	4,0%	4%
VAM (%)	Min. 14	16,1%	15,9%	15,0%	Min. 14
VFA (%)	-	68,4%	69,4%	73,1%	65% - 75%
Fluencia (x 0,01")	8 - 16	14	16	-	-
Estabilidad (N)	Min. 9000	9817	14676	-	-
%Gmm(ini) (%)	-	-	-	87%	Max. 89%
%Gmm(max) (%)	-	-	-	97%	Max. 98%
Porción de Polvo	-	-	-	1,00	0,6% - 1,2%

- En la comparación de resultados se pudo observar que el ligante asfáltico óptimo para el diseño fue de un 5,2%. Esto indica que si bien se utilizaron métodos distintos, finalmente se obtuvo el mismo resultado.
- En la comparación de las densidades máximas de las mezclas compactadas se observaron exactamente los mismos valores, ya que se trabajó con la misma granulometría, la misma cantidad de asfalto y sin vacíos de aire, lo que significa que los espacios de vacíos estarían todos ocupados por el ligante asfáltico, esto se calcula de la misma manera para ambos métodos.
- En relación a las densidades se puede observar que los valores son muy similares, aún así es importante destacar que en el caso del método Superpave éstas son ligeramente mayores, ya que el compactador giratorio compactó un poco más la probeta a la cantidad de ligante asfáltico óptimo. Cabe destacar que el compactador giratorio representa de mejor manera el amasado de la mezcla en condiciones reales del terreno.
- El volumen de vacíos de aire es menor en el método Superpave, debido a que la probeta está más compactada a diferencia de los métodos Marshall el cual la compactación fue menor.
- El volumen de vacíos en el agregado mineral es menor ya que el volumen de vacíos de aire en la mezcla compactada es menor, ambos se encuentran directamente relacionados.
- El volumen de vacíos llenados con asfalto es cercano a un 70%. Para todos los métodos este volumen debería ser igual o muy cercano, ya que está relacionado con la variación entre VAM y Va.
- Al comparar los resultados de fluencia por el método Marshall se aprecia en la tabla 4.1 que los valores son cercanos y dentro de los parámetros establecidos.
- En la estabilidad de la mezcla se puede observar que los valores obtenidos son mayores que la de la empresa proveedora lo cual significa que la mezcla de esta empresa es más inestable que la que se replicó. La empresa proveedora baja sus valores de estabilidad para que al determinar la estructura del pavimento (carpeta asfáltica, base y sub-base granular) sea en condiciones de mayor inestabilidad asegurando una estructura adecuada del pavimento.

4.2.2 Comparación para los distintos contenidos de asfalto

En la siguiente tabla se puede observar los valores más relevantes para el diseño de la mezcla asfáltica de cada contenido de asfalto por los métodos Marshall y de la empresa proveedora, Marshall y Superpave.

Tabla 4.3- Parámetros por contenido de asfalto.

Parámetros Marshall empresa proveedora	Asfalto C-24	% ref. ag.	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%
	Dmm	kg/m3	2486	2470	2453	2437	2421
	Densidad	kg/m3	2316	2333	2344	2336	2332
	V.A.	%	6,8%	5,5%	4,4%	4,1%	3,7%
	V.A.M.	%	16,3%	16,1%	16,1%	16,7%	17,3%
	V.F.A.	%	58%	65%	72%	75%	79%
	Fluencia	0,01"	12,3	13,3	14,2	15,4	16,5
	Estabilidad	N	9681	9858	9755	9623	9483
Parámetros Marshall	Asfalto C-24	% ref. ag.	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%
	Dmm	kg/m3	2486	2469	2453	2437	2421
	Densidad	kg/m3	2323,3	2340,1	2347,6	2343,3	2330,6
	V.A.	%	6,5%	5,2%	4,3%	3,8%	3,7%
	V.A.M.	%	16,0%	15,8%	15,9%	16,5%	17,3%
	V.F.A.	%	59,1%	66,9%	73,1%	76,8%	78,5%
	Fluencia	0,01"	14,7	15,7	17,3	17,7	18,00
	Estabilidad	N	13346	14872	14381	13749	13465
Parámetros Superpave	Asfalto C-24	% ref. ag.	4,7%	5,2%	5,7%	6,2%	
	Dmm	kg/m3	2479,3	2462,5	2446,2	2430,2	
	Densidad	kg/m3	2331	2345	2338	2329	
	V.A.	%	5,1%	4,0%	3,6%	3,4%	
	V.A.M.	%	15,4%	15,0%	15,2%	15,6%	
	V.F.A.	%	67%	73%	76%	78%	

Los valores más resaltados fueron parámetros relevantes para la obtención del ligante asfáltico óptimo.

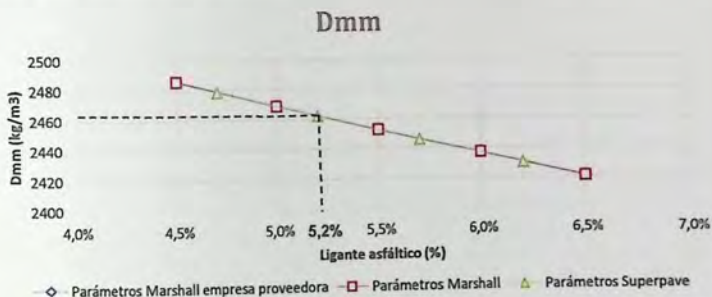
En el método Superpave el ligante asfáltico óptimo se obtiene con un 4% de volumen de vacíos de aire.

En el método Marshall el ligante asfáltico óptimo se obtiene promediando el ligante asfáltico que tenga la densidad más alta, mejor estabilidad y al 5% de volumen de vacíos de aire. Se puede observar en la ecuación 2.15.

4.2.3 Comparación gráfica

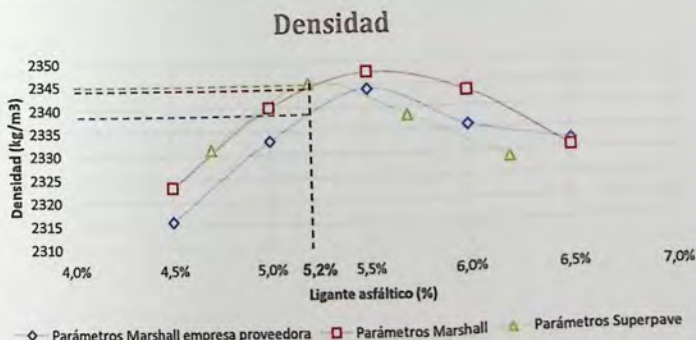
En esta comparación se analizará los parámetros de la tabla 4.3

Dmm corresponde a la densidad máxima de la mezcla que no considera porcentaje de vacíos de aire, por lo que al tener la misma granulometría y al utilizar el mismo tipo de asfalto, la Dmm debe ser la misma para cada porcentaje de ligante asfáltico. En el gráfico se comprueba que los valores del Dmm se superponen para los 3 distintos parámetros.

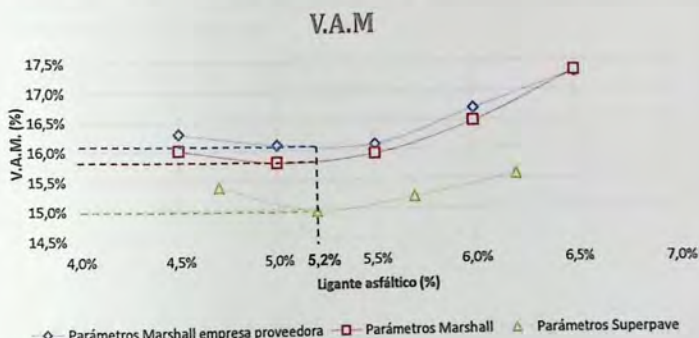


A medida de que tenga más asfalto su densidad máxima sería menor ya que la densidad del asfalto es menor que la del agregado pétreo.

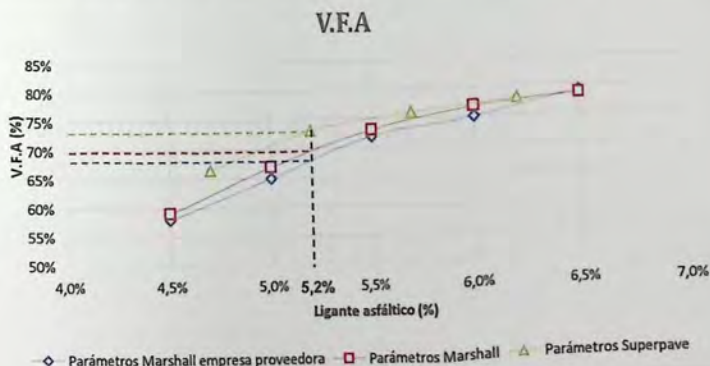
En el siguiente gráfico se observa que las densidades o Gmb representadas en una curva tienen un valor máximo que indica el ligante óptimo por densidad en el método Marshall. El valor máximo en el método Superpave indica su ligante asfáltico óptimo. Esto sucede porque la mezcla tiene que estar en un equilibrio con la cantidad de ligante asfáltico, ya que la densidad es mas baja cuando existe un excedente o una falta de ligante asfáltico. Los tres parámetros tienen una curvatura similar.



El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. En el siguiente gráfico se puede observar que si bien las curvas son similares, los valores por la metodología Superpave son menores, lo que está representado en la existencia de un menor espacio disponible para que entre el ligante asfáltico a la mezcla de áridos, esto ocurre debido a que los volúmenes de vacíos de aire también son menores en el método Superpave, el cual está directamente relacionado con el VAM. Normalmente la curva decrece hasta un valor mínimo y luego incrementa al aumentar la cantidad de asfalto en la mezcla.



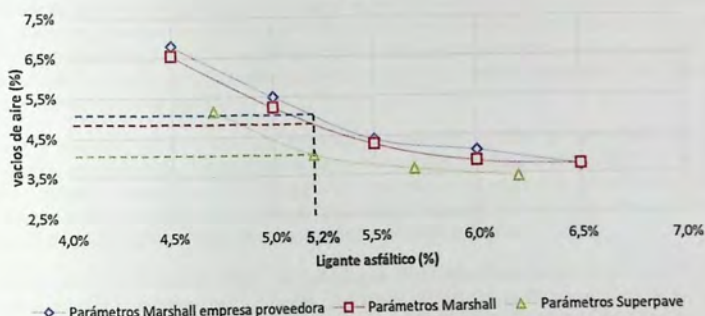
En el siguiente gráfico se observa que los volúmenes de vacíos llenados con asfalto están entre un rango de 55% a 80% del VAM, a medida que se le agrega más asfalto el VFA aumenta su valor. Al comparar los métodos se puede observar que Superpave tiene un valor de VFA prácticamente igual a los métodos Marshall ya que representa los porcentajes de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VAM) que se encuentran llenos de asfalto ((VAM-Va) entre VAM).



Tras determinar los volúmenes de vacíos de aire de la mezcla asfáltica, se puede observar que el comportamiento de cada curva es similar, pero la compactación a través del método Superpave realizada por el compactador giratorio nos muestra que la mezcla queda más compactada que las realizadas por el método Marshall. Los volúmenes de vacíos de aire obtenidos por el método Superpave son menores, debido a que al momento de considerar el tránsito vehicular según los ESALs la mezcla estaría más compactada con cualquier porcentaje de asfalto, viendo así la importancia que tiene para el método Superpave considerar los ESALs.

Se considera relevante el volumen de vacíos de aire, ya que al tener un porcentaje bajo de V_a podría generar exudación a la mezcla, por el contrario si el valor de V_a es alto se podrían generar grandes deterioros por el ingreso del agua y aire.

V.A.



5 Conclusión

La metodología Marshall ha demostrado la versatilidad de su equipo para llevar a cabo acciones de control de calidad en terreno, siendo esto su gran ventaja respecto del compactador giratorio del método Superpave. A su vez el compactador Marshall posee una segunda ventaja respecto del compactador giratorio Superpave, la cual es que puede ser transportado a terreno. Una tercera ventaja de la metodología Marshall consiste en el hecho que para efectuar la selección de ligante asfáltico utiliza probetas bastante más pequeñas las cuales se elaboran de manera más rápidas que las confeccionadas con la otra metodología en estudio, reduciendo de manera significativa los tiempos empleados en los ensayos necesarios. En definitiva, este método es menos complejo y más rápido.

La metodología Superpave tiene por otro lado otras ventajas con respecto al método Marshall como son los importantes avances en lo que se refiere a la selección de las mezclas de agregados, del ligante asfáltico y su compactación. Se destaca la importancia de seleccionar una buena estructura de agregados ya que éste da la rigidez al pavimento y el asfalto sería el aglomerante para que esta estructura se mantenga rígida.

Para la selección de las mezclas de agregado, el método Superpave ha demostrado ser más exigente, ya que no sólo considera puntos de control de igual manera que el método Marshall sino que también considera una zona de restricción, una porción de polvo para un parámetro de la granulometría más fina y evalúa 3 distintas estructuras de agregado mineral incorporando la misma cantidad de asfalto para escoger la estructura más adecuada al diseño.

Para la selección de ligante asfáltico la metodología Superpave muestra que se debe escoger un ligante asfáltico que cuando se mezcle con el agregado debe tener un 4% de volumen de vacío de aire, ya que éste representaría un punto óptimo para el diseño, que disminuiría las deformaciones permanentes en el pavimento asfáltico. Por otro lado, el método Marshall promedia tres variables para determinar el ligante asfáltico óptimo, siendo éstas: la densidad más alta, la estabilidad más alta y escoger un asfalto al 5% de volumen de vacíos de aire. Por el método Marshall no se puede escoger un 4% de volumen de vacíos de aire ya que el ligante asfáltico óptimo sería cercano a un 6% el cual podría generar exudación de la mezcla.

Como ya se ha señalado anteriormente, la compactación mediante el método Marshall tiene mayor versatilidad y simula la compactación ocasionada para cualquier volumen de tránsito a través del compactador Marshall. Por otra parte, el compactador giratorio del método Superpave al determinar el asfalto óptimo posee la capacidad de lograr levemente mayores densidades que el compactador Marshall, por lo mismo, al ser más denso tiene menor volumen de vacíos de aire y menor volumen de vacíos del agregado mineral. Además, el compactador giratorio tiene la ventaja de registrar la compactación de la mezcla (según el número de giros) simulando de mejor manera el tránsito vehicular (compactando la mezcla de manera cíclica y no de impacto), considerando el volumen de tránsito particular de cada diseño. Esta información resulta ser relevante ya que permite de forma precisa determinar los parámetros volumétricos y de compactación a emplear.

En definitiva, este estudio comparativo ha permitido demostrar que no existen diferencias significativas entre ambos métodos en lo concerniente a las características de mezcla de diseño para el volumen de tránsito escogido, sin perjuicio de ello, debe señalarse que cada metodología presenta ventajas respecto de la otra. Así, el método Marshall destaca por su versatilidad y rápida elaboración en laboratorio, lo que redundará en el acortamiento de los tiempos de trabajo. Por su parte, el método Superpave resalta por incorporar como variable de diseño el flujo vehicular por ejes equivalentes (ESALs), lo que permite efectuar un diseño más ajustado a las condiciones de cargas reales a las cuales se somete el pavimento, además de restringir de mejor manera la estructura del agregado mineral.

Se recomendaría para un estudio posterior realizar esta misma investigación para otras rutas con niveles de tránsito altas o muy bajas que muestran más claramente las diferencias de dosificación al considerar una metodología de diseño realista como el Superpave.

6 Bibliografía

- [1] ASTM D1559: Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus
- [2] Manual de Carretera. 8.301.1: Especificaciones Cemento Asfálticos según grado de Viscosidad
- [3] Manual de Carretera 8.003.7: Plan de aseguramiento de calidad (PAC)
- [4] Manual de Carretera 8.202.20: método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en pétreos gruesos.
- [5] Manual de Carretera 8.202.6: método para determinar cubicidad de las partículas
- [6] Manual de Carretera 8.202.21: método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en pétreos finos.
- [7] Manual de Carretera 5.408.201: Mezclas asfálticas en caliente
- [8] Manual de Carretera 8.302.40: Método para determinar la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas utilizando el aparato Marshall.
- [9] Manual de Carretera 8.302.41: Método para determinar el espesor de muestras asfálticas compactadas
- [10] Manual de Carretera 8.302.47: Método de diseño Marshall
- [11] Manual de Carretera 3.603.202: Tránsito
- [12] AASHTO M 323: Superpave Volumetric Mix Design
- [13] AASHTO T 312: Preparing and Determining the Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor
- [14] AASHTO R30: Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt
- [15] AASHTO R35: Superpave Volumetric Design for Hot Mix Asphalt (HMA)



7 Anexos

Índice de anexos:

Anexo A: Procedimiento para análisis granulométricos de Gravilla 5/11	93
Anexo B: Reconstituciones de material	101
Anexo C: Datos obtenidos por el compactador giratorio.....	105
Anexo D: Otra manera de determinar %Gmm.....	109
Anexo E: Datos obtenidos con cálculos de Gmb y %Gmm por cada giro y por las 4 cantidades de asfalto que se analizaron.	110

Anexo A: Procedimiento para análisis granulométricos de Gravilla 5/11

A. Granulometría

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar granulometría.

Masa mínima para realizar granulometría.

Tamaño máximo absoluto de las partículas (mm).	Masa mínima de muestra (Kg).
80	32
63	25
50	20
40	16
25	10
19	8
12,5	5
10	4

Para los ensayos se debe seleccionar una cantidad de árido, el cual al secarlo en el horno deba tener una masa mayor a los 5000 g, ya que la gravilla 5/11 tiene un tamaño máximo probable de 11 mm. Se escoge el tamaño máximo absoluto de 12,5mm por el cual pasa el 100% del material.

Después de secarlo completamente se iniciará el tamizado, donde se determinarán los porcentajes del árido que pasa por cada tamaño de tamiz.

Peso muestra total	=	5035	g
Peso muestra lavada seca	=	4991	g

Porcentaje que pasa del tamizado.

NCh (mm)	ASTM (inch)	Peso retenido		% que pasa
		Peso retenido	% retenido	
50	2"			
40	1 1/2"			
25	1"			
19	3/4"			100
12,5	1/2"	1303	26	74
10	3/8"	3550	70	4
5	Nº 4	116	2	2
2,5	Nº 8			
1,25	Nº 16			
0,63	Nº 30			
0,315	Nº 50			
0,16	Nº 100			
0,08	Nº 200			
R		20		

B. Densidad real seca, densidad neta y absorción

Corresponde a la cantidad mínima de muestra según tamaño máximo absoluto del árido.

Masa mínima para realizar ensayos de densidades y absorción.

Tamaño máximo absoluto de las partículas (mm)	Masa mínima de muestra (g)
12,5	2000
19	3000
25	4000
40	5000
50	8000

La masa mínima de muestra fue de 2000 g.

Densidad real seca, densidad neta y absorción

muestras		M1	M2	Unidades
PSS	X	3330	3397	g
peso bajo agua	Y	2086	2131	g
peso seco	Z	3284	3351	g
densidad real seca	ρ_{RS}	2640	2647	kg/m ³
densidad neta	ρ_N	2741	2747	kg/m ³
absorción	α'	1,4	1,37	%
densidad real seca	ρ_{RS}		2644	kg/m ³
densidad neta	ρ_N		2744	kg/m ³
Absorción	α		1,39	%

La muestra se pesa en un canastillo sumergido en agua a 20±3°C por un periodo de 3 min para obtener el "peso bajo el agua".

El peso superficialmente seco de una probeta (PSS) se determina después de sacar la muestra húmeda del canastillo y secándola superficialmente con un paño absorbiendo la humedad superficial, luego se pesa obteniendo así el PSS. El manual de carreteras recomienda que este proceso sea sumamente rápido para una mayor precisión de los datos obtenidos.

Peso seco es el peso de la muestra totalmente seca, el cual se debe secar al horno a una temperatura de 110±5°C para luego enfriarlo a temperatura de aproximadamente 30°C y posteriormente pesarlo.

A través de las siguientes ecuaciones se determina la densidad real seca, densidad neta y absorción:

Densidad real seca

$$\rho_{RS} = \frac{Z}{X - Y} \times 1000$$

Densidad neta

$$\rho N = \frac{Z}{Z - Y} \times 1000$$

Absorción

$$\alpha = \frac{X - Z}{Z} \times 100$$

Después se determinan los parámetros de las densidades y el de absorción promedios para ambas muestras (M1 y M2).

C. Densidad aparente suelta

Para la obtención de la densidad aparente suelta se determina el volumen de ésta, se pesan las dos muestras y se determina un promedio el cual sería la masa promedio, después se calcula la diferencia entre la masa medida y la masa del recipiente para obtener la masa de la muestra suelta. Para finalizar se determina la densidad aparente suelta entre la masa suelta y el volumen.

Para calcularlas se utilizan las siguientes ecuaciones:

Masa de la muestra suelta

$$Ms = Mp - Mm$$

Densidad aparente suelta

$$\rho_{as} = \frac{Ms}{V}$$

Densidad aparente suelta.

Volumen medida	V	3,018	lt
Masa medida (recipiente)	Mm	2500	g
Masa material + masa medida	1	6888	g
	2	6903	g
Masa promedio	Mp	6896	g
Masa muestra suelta	Ms	4396	g
Densidad aparente	ρ_{as}	1460	kg/m ³

D. Cubicidad de partículas

Este método establece el procedimiento para determinar el contenido porcentual de partículas chancadas, rodadas y lajeadas de la fracción de un pétreo retenida en el tamiz de 5 mm.

Cubicidad de las partículas.

Tamaño máximo absoluto de las partículas (mm)	Masa mínima de muestra (g)
50	2000
25	1000
19	500
12,5 y menor	250

Pesos chancados y rodados.

Peso muestra total	M =	369,3	g
Peso material chancado	N =	269,3	g
Peso material rodado	O =	0	g
Peso laja chancada	P =	0	g
Peso laja rodada	Q =	0	g

Cumpliendo con la masa mínima se puede proseguir con el análisis de chancado, rodado y partículas lajeadas.

Porcentajes de chancado, rodado y lajas.

Chancado total	$(N + P)/M =$	100	%
Rodado	$(O + Q)/M =$	0	%
Lajas	$(P + Q)/M =$	0	%

Análisis granulométricos de Polvo roca 0/5**A. Granulometría**

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar granulometría.

Masa mínima para realizar granulometría.

Tamaño máximo absoluto de las partículas (mm).	Masa mínima de muestra (Kg).
80	32
63	25
50	20
40	16
25	10
19	8
12,5	5
10	4

Para los ensayos se debe seleccionar una cantidad de árido, el cual al secarlo en el horno deba tener una masa mayor a los 4000 g, ya que la polvo roca 0/5 tiene un tamaño máximo probable de 5mm. Se escoge el tamaño máximo absoluto de 10mm por el cual pasa el 100% del material.

Después de secarlo completamente se iniciará el tamizado, donde se determinarán los porcentajes del árido que pasa por cada tamaño de tamiz.

Peso muestra total	=	4544	g
Peso muestra lavada seca	=	3976	g

Porcentaje que pasa del tamizado.

NCh	ASTM	Peso retenido		% que pasa
(mm)	(inch)	Peso retenido	% retenido	
50	2"			
40	1 1/2"			
25	1"			
19	3/4"			
12,5	1/2"			100
10	3/8"	352	8	92
5	N° 4	1344	30	62
2,5	N° 8			
1,25	N° 16	1416	31	31
0,63	N° 30	400	9	22
0,315	N° 50	272	6	16
0,16	N° 100	188	4	12
0,08	N° 200	3		
R		20		

B. Densidad real seca, densidad neta y absorción

Corresponde a la cantidad mínima de muestra según tamaño máximo absoluto del árido.

Masa mínima para realizar ensayos de densidades y absorción.

Tamaño máximo absoluto de las partículas (mm)	Masa mínima de muestra (g)
12,5 y menor	2000
19	3000
25	4000
40	5000
50	8000

Para nuestro caso masa mínima de muestra sería de 2000 g.

Densidad real seca, densidad neta y absorción

muestras		M1	M2	Unidades
PSS	X	2853	2828	g
peso bajo agua	Y	1794	1776	g
peso seco	Z	2823	2798	g
densidad real seca	pRS'	2666	2660	kg/m ³
densidad neta	pN'	2743	2738	kg/m ³
absorción	α'	1,06	1,07	%
densidad real seca	pRS	2663		kg/m ³
densidad neta	pN	2741		kg/m ³
Absorción	α	1,07		%

La muestra se pesa en un canastillo sumergido en agua a 20±3°C por un periodo de 3 min para obtener el "peso bajo el agua".

El peso superficialmente seco de una probeta (PSS) se determina después de sacar la muestra húmeda del canastillo y secándola superficialmente con un paño absorbiendo la humedad superficial, luego se pesa obteniendo así el PSS. El manual de carreteras recomienda que este proceso sea sumamente rápido para una mayor precisión de los datos obtenidos.

Peso seco es el peso de la muestra totalmente seca, el cual se debe secar al horno a una temperatura de 110±5°C para luego enfriarlo a temperatura de aproximadamente 30°C y posteriormente pesarlo.

A través de las siguientes ecuaciones se determina la densidad real seca, densidad neta y absorción:

Densidad real seca

$$pRS = \frac{Z}{X - Y} \times 1000$$

Densidad neta

$$pN = \frac{Z}{Z - Y} \times 1000$$

Absorción

$$\alpha = \frac{X - Z}{Z} \times 100$$

Después se determinan los parámetros de las densidades y el de absorción promedios para ambas muestras (M1 y M2).

C. Densidad aparente suelta

Para la obtención de la densidad aparente suelta se determina el volumen de ésta, se pesan las dos muestras y se determina un promedio el cual sería la masa promedio, después se calcula la diferencia entre la masa medida y la masa del recipiente para obtener la masa de la muestra suelta. Para finalizar se determina la densidad aparente suelta entre la masa suelta y el volumen.

Para calcularlas se utilizan las siguientes ecuaciones:

Masa de la muestra suelta

$$M_s = M_p - M_m$$

Densidad aparente suelta

$$\rho_{as} = \frac{M_s}{V}$$

Densidad aparente suelta.

Volumen medida	V	3,018	lt
Masa medida (recipiente)	Mm	2500	g
Masa material + masa medida	1	7353	g
	2	7332	g
Masa promedio	Mp	7343	g
Masa muestra suelta	Ms	4843	g
Densidad aparente	ρ_{as}	1600	kg/m ³

D. Cubicidad de partículas

Este método establece el procedimiento para determinar el contenido porcentual de partículas chancadas, rodadas y lajeadas de la fracción de un pétreo retenida en el tamiz de 5 mm.

Cubicidad de las partículas.

Tamaño máximo absoluto de las partículas (mm)	Masa mínima de muestra (g)
50	2000
25	1000
19	500
12,5 y menor	250

Pesos chancados y rodados.

Peso muestra total	M =	251,3	g
Peso material chancado	N =	251,3	g
Peso material rodado	O =	0	g
Peso laja chancada	P =	0	g
Peso laja rodada	Q =	0	g

Cumpliendo con la masa mínima se puede proseguir con el análisis de chancado, rodado y partículas lajeadas.

Porcentajes de chancado, rodado y lajas.

Chancado total	$(N + P)/M =$	100	%
Rodado	$(O + Q)/M =$	0	%
Lajas	$(P + Q)/M =$	0	%

E. Densidades y absorción de pétreos finos [6].

Según el Manual de Carreteras se pueden determinar las densidades y absorción de los pétreos finos aplicando las formulas.

Densidad real seca de pétreos finos

$$\rho_{RS} = \frac{C}{A + B - D} \times 1000$$

Densidad neta de pétreos finos

$$\rho_N = \frac{C}{A + C - D} \times 1000$$

Absorción de pétreos finos

$$\alpha = \frac{B - C}{C} \times 100$$

Densidades y absorción de pétreos finos.

		Muestra 1	Muestra 2	Unidades
Peso Matraz + agua	A	648,8	657,5	g
PSS	B	197,3	199	g
Peso seco	C	196,5	198,5	g
Peso Matraz + agua hasta calibración	D	771,5	781,3	g
Densidad real seca		2634	2640	kg/m ³
Densidad neta		2663	2657	kg/m ³
Absorción		1,4	1,3	%
Promedio densidad real seca		2637		kg/m ³
Promedio densidad neta		2660		kg/m ³
Promedio absorción		1,4		%

F. Densidad del integral [6].

Corresponden a los datos obtenidos a través de un tamiz de referencia, el cual es de 2,5 mm de abertura y se determinan sus densidades y absorción de la misma manera que en el punto anterior.

Densidad del integral.

Tamiz referencia (mm)	2,5	mm
% que pasa tamiz referencia	62	%
Densidad real seca del integral	2647	kg/m ³
Densidad neta del integral	2691	kg/m ³
Absorción del integral	1,3	%



Anexo B: Reconstituciones de material

Reconstitución Marshall para 15 muestras

Para determinar si la dosificación en peso de los áridos en conjunto según las características de la mezcla cumple con la especificación de la Banda IV-A-12, se procederá a pesar el material retenido en cada tamiz y se determina si el porcentaje cumple con las especificaciones.

Para que exista menos rango de error, en este análisis se utilizarán dos bolsas del mismo material y mismo tamaño.

N° bolsas	15
Peso X bolsa (g)	1100

Ya obtenida la dosificación con anterioridad, se podrá determinar el peso de cada bolsa y el total de cada material.

Peso por material.

	Dosificación	peso x bolsa (g)	peso total (g)
Gravilla 11/17	20%	220	3300
Gravilla 5/11	28%	308	4620
Polvo Roca 0/5	52%	572	8580

A su vez al tener la granulometría es posible determinar el peso de cada tamiz con su respectivo material.

Peso de cada tamiz por cada material.

Tamiz	Gravilla 11/17				Gravilla 5/11				Polvo Roca 0/5			
	%pasa	%ret	peso un (g)	peso total (g)	%pasa	%ret	peso un (g)	peso total (g)	%pasa	%ret	peso un (g)	peso total (g)
3/4	100											
1/2	32	68	149,6	2244	100				100			
3/8	1	31	68,2	1023	74	26	80,1	1201,2	92	8	45,8	686,4
4					3	71	218,7	3280,2	62	30	177,8	2666,4
8					1	2	6,2	92,4	62	30	177,8	2666,4
Bajo#8		1	2,2	33		1	3,1	46,2		62	359,9	5398,8

Los valores representados por el color rojo pertenecientes a la gravilla 11/17 y gravilla 5/11 fueron reemplazados por el material polvo roca para la realización de las bolsas, ya que al ser de valores tan bajos es difícil reconstituirlos con el material de las gravillas. Este procedimiento es válido, ya que los áridos vienen de la misma procedencia.

La siguiente tabla no permite observar el peso acumulado de cada muestra para crear la bolsa.

Resumen de peso de cada tamiz por material.

	Gravilla 11/17		Gravilla 5/11		Polvo Roca 0/5		
	1/2"	3/8"	3/8"	N° 4	N° 4	N° 8	Bajo N° 8
Granulometría (g)	149,6	68,2	80,1	218,7	45,8	177,8	359,9
Granulometría acum. (g)	149,6	217,8	297,88	516,56	562,32	740,08	1100

Después de que se mezclaron los materiales y se obtuvo el peso aproximado de 1100 gramos, se tamiza nuevamente el material para verificar su cumplimiento con la banda IV-A-12 y su dependencia con lo medido por la empresa proveedora.

Reconstitución Superpave para 2 muestras

Para que exista menos rango de error, en este análisis se utilizarán dos bolsas del mismo material.

N° bolsas	2
Peso X bolsa (g)	4500

Ya obtenida la dosificación con anterioridad, se podrá determinar el peso de cada bolsa y el total de cada material.

Peso por material.

	Dosificación	peso x bolsa (g)	peso total (g)
Gravilla 11/17	20%	900	1800
Gravilla 5/11	28%	1260	2520
Polvo Roca 0/5	52%	2340	4680

A su vez al tener la granulometría es posible determinar el peso de cada tamiz con su respectivo material.

Peso de cada tamiz por cada material.

Tamiz	Gravilla 11/17				Gravilla 5/11				Polvo Roca 0/5			
	%pasa	%ret	peso un (g)	peso total (g)	%pasa	%ret	peso un (g)	peso total (g)	%pasa	%ret	peso un (g)	peso total (g)
3/4	100				100							
1/2	38	62	558	558	100							
3/8	5	33	297	855	74	26	327,6	327,6	100			
4	4	1	9	864	4	70	882,0	1209,6	92	8	187,2	187,2
8	3	1	9	873	2	2	25,2	1234,8	62	30	702,0	889,2
Bajo#8		3	27	900		2	25,2	1260		62	1450,8	2340

Los valores representados por el color rojo pertenecientes a la gravilla 11/17 y gravilla 5/11 fueron reemplazados por el material polvo roca para la realización de las bolsas, ya que al ser de valores tan bajos es difícil reconstituirlos con el material de las gravillas. Este procedimiento es válido, ya que los áridos vienen de la misma procedencia.

La siguiente tabla no permite observar el peso acumulado de cada muestra para crear la bolsa.

Resumen de peso de cada tamiz por material.

	Gravilla 11/17		Gravilla 5/11		Polvo Roca 0/5		
	1/2"	3/8"	3/8"	N° 4	N° 4	N° 8	Bajo N° 8
Granulometría (g)	558	297	327,6	891,0	187,2	736,2	1503,0
Granulometría acum. (g)	558	855	1182,6	2073,6	2260,8	2997	4500

Después de mezclar los materiales y obtener el peso aproximado de 4500 gramos.

Reconstitución Superpave para 6 muestras

N°bolsas	6
Peso X bolsa (gr)	4500

Ya obtenida la dosificación con anterioridad, se podrá determinar el peso de cada bolsa y el total de cada material.

Agregado 3/4"	20%	900	5400
Agregado 1/2"	28%	1260	7560
Polvo Roca	52%	2340	14040

A su vez al tener la granulometría es posible determinar el peso de cada tamiz con su respectivo material.

Tamiz	Agregado 3/4"				Agregado 1/2"				Polvo Roca			
	20%				28%				52%			
ASTM	%pasa	%ret	peso un	Peso acum	%pasa	%ret	peso un	Peso acum	%pasa	%ret	peso un	Peso acum
(inch)												
3/4"	100				100							
1/2"	38	62	558	558	100							
3/8"	5	33	297	855	74	26	327,6	327,6	100			
N° 4	4	1	9	864	4	70	882,0	1209,6	92	8	187,2	187,2
N° 8	3	1	9	873	2	2	25,2	1234,8	62	30	702,0	889,2
residuo		3	27	900		2	25,2	1260		62	1450,8	2340

Los valores representados por el color rojo pertenecientes a la gravilla 11/17 y gravilla 5/11 fueron reemplazados por el material polvo roca para la realización de las bolsas, ya que al ser de valores tan bajos es difícil reconstituirlos con el material de las gravillas. Este procedimiento es válido, ya que los áridos vienen de la misma procedencia.

La siguiente tabla no permite observar el peso acumulado de cada muestra para crear la bolsa.

	Gravilla 11/17		Gravilla 5/11		Polvo Roca 0/5		
	1/2	3/8	3/8	4	4	8	residuo
granulometría	558	297	327,6	891,0	187,2	736,2	1503,0
granulometría acumulada	558	855	1182,6	2073,6	2260,8	2997	4500

Después de mezclar los materiales y obtener el peso aproximado de 4500 gramos.

Anexo C: Datos obtenidos por el compactador giratorio

Datos obtenidos por el compactador giratorio al 4,7% de asfalto

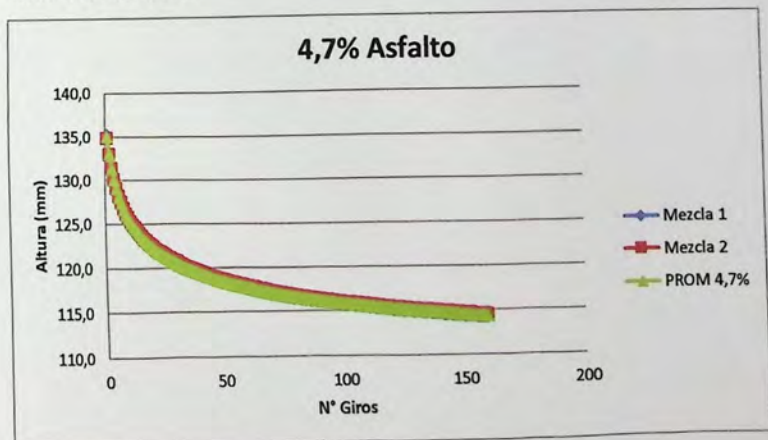
N° Giros	Altura de la probeta		
	Mezcla 1	Mezcla 2	PROM 4,7%
1	135,3	134,9	135,1
2	133,2	133,0	133,1
3	131,4	131,4	131,4
4	130,1	130,1	130,1
5	129,1	129,1	129,1
6	128,1	128,2	128,2
7	127,4	127,5	127,5
8	126,6	126,8	126,7
9	126,1	126,2	126,2
10	125,6	125,8	125,7
11	125,1	125,3	125,2
12	124,7	124,9	124,8
13	124,3	124,6	124,5
14	124,0	124,2	124,1
15	123,7	123,9	123,8
16	123,3	123,6	123,5
17	123,1	123,3	123,2
18	122,8	123,1	123,0
19	122,5	122,8	122,7
20	122,3	122,6	122,5
21	122,1	122,4	122,3
22	121,9	122,1	122,0
23	121,6	121,9	121,8
24	121,5	121,8	121,7
25	121,3	121,6	121,5
26	121,1	121,4	121,3
27	121,0	121,2	121,1
28	120,8	121,1	121,0
29	120,6	120,9	120,8
30	120,5	120,8	120,7
31	120,3	120,7	120,5
32	120,2	120,5	120,4
33	120,1	120,4	120,3
34	119,9	120,2	120,1
35	119,8	120,1	120,0
36	119,7	120,0	119,9
37	119,6	119,9	119,8
38	119,5	119,8	119,7
39	119,4	119,7	119,6
40	119,3	119,6	119,5
41	119,2	119,5	119,4

42	119,1	119,4	119,3
43	119,0	119,3	119,2
44	118,9	119,2	119,1
45	118,8	119,1	119,0
46	118,7	119,0	118,9
47	118,6	118,9	118,8
48	118,5	118,8	118,7
49	118,4	118,7	118,6
50	118,3	118,7	118,5
51	118,3	118,6	118,5
52	118,2	118,5	118,4
53	118,1	118,4	118,3
54	118,0	118,3	118,2
55	118,0	118,3	118,2
56	117,9	118,2	118,1
57	117,8	118,1	118,0
58	117,8	118,1	118,0
59	117,7	118,0	117,9
60	117,6	117,9	117,8
61	117,6	117,9	117,8
62	117,5	117,8	117,7
63	117,5	117,8	117,7
64	117,4	117,7	117,6
65	117,3	117,6	117,5
66	117,3	117,6	117,5
67	117,2	117,5	117,4
68	117,2	117,5	117,4
69	117,1	117,4	117,3
70	117,0	117,3	117,2
71	117,0	117,3	117,2
72	116,9	117,2	117,1
73	116,9	117,2	117,1
74	116,8	117,1	117,0
75	116,8	117,1	117,0
76	116,7	117,0	116,9
77	116,7	117,0	116,9
78	116,6	116,9	116,8
79	116,6	116,9	116,8
80	116,5	116,8	116,7
81	116,5	116,8	116,7
82	116,5	116,7	116,6
83	116,4	116,7	116,6
84	116,4	116,7	116,6
85	116,3	116,6	116,5
86	116,3	116,6	116,5
87	116,2	116,5	116,4
88	116,2	116,5	116,4

89	116,2	116,4	116,3
90	116,1	116,4	116,3
91	116,1	116,4	116,3
92	116,1	116,3	116,2
93	116,0	116,3	116,2
94	116,0	116,3	116,2
95	116,0	116,2	116,1
96	115,9	116,2	116,1
97	115,9	116,1	116,0
98	115,8	116,1	116,0
99	115,8	116,1	116,0
100	115,8	116,0	115,9
101	115,8	116,0	115,9
102	115,7	116,0	115,9
103	115,7	116,0	115,9
104	115,7	115,9	115,8
105	115,6	115,9	115,8
106	115,6	115,9	115,8
107	115,6	115,8	115,7
108	115,5	115,8	115,7
109	115,5	115,8	115,7
110	115,5	115,7	115,6
111	115,4	115,7	115,6
112	115,4	115,7	115,6
113	115,4	115,6	115,5
114	115,3	115,6	115,5
115	115,3	115,6	115,5
116	115,3	115,5	115,4
117	115,3	115,5	115,4
118	115,2	115,5	115,4
119	115,2	115,5	115,4
120	115,2	115,4	115,3
121	115,1	115,4	115,3
122	115,1	115,4	115,3
123	115,1	115,4	115,3
124	115,1	115,3	115,2
125	115,0	115,3	115,2
126	115,0	115,3	115,2
127	115,0	115,2	115,1
128	115,0	115,2	115,1
129	114,9	115,2	115,1
130	114,9	115,2	115,1
131	114,9	115,1	115,0
132	114,9	115,1	115,0
133	114,8	115,1	115,0
134	114,8	115,1	115,0
135	114,8	115,1	115,0

136	114,8	115,0	114,9
137	114,7	115,0	114,9
138	114,7	115,0	114,9
139	114,7	115,0	114,9
140	114,7	114,9	114,8
141	114,7	114,9	114,8
142	114,6	114,9	114,8
143	114,6	114,9	114,8
144	114,6	114,9	114,8
145	114,6	114,8	114,7
146	114,5	114,8	114,7
147	114,5	114,8	114,7
148	114,5	114,8	114,7
149	114,5	114,7	114,6
150	114,5	114,7	114,6
151	114,4	114,7	114,6
152	114,4	114,7	114,6
153	114,4	114,7	114,6
154	114,4	114,6	114,5
155	114,4	114,6	114,5
156	114,3	114,6	114,5
157	114,3	114,6	114,5
158	114,3	114,6	114,5
159	114,3	114,6	114,5
160	114,3	114,5	114,4

Gráfico de los resultados:



Anexo D: Otra manera de determinar %Gmm_n

Otra ecuación para determinar %Gmm_n:

$$\text{Ecuación 1)} \quad Gmb_n = \frac{Gmb(\text{diseño}) \times H(\text{diseño})}{H_n} = \frac{Gmb(\text{max}) \times H(\text{max})}{H_n}$$

$$\text{Ecuación 2)} \quad \%Gmm_n = 100 \times \frac{Gmb(\text{diseño}) \times F.C. \times H(\text{diseño})}{Gmm \times H_n}$$

Ecuación 1 se reemplaza en la ecuación 2 y se obtiene la ecuación final:

$$\%Gmm_n = 100 \times \frac{Gmb_n \times F.C.}{Gmm}$$

$$\%Gmm_n = 100 \times \frac{Gmb_n \times 1,022}{2479}$$

Anexo E: Datos obtenidos con cálculos de Gmb y %Gmm por cada giro y por las 4 cantidades de asfalto que se analizaron.

Ligante asfáltico 4,7%

Datos obtenidos por el compactador giratorio y cálculos de Gmb y %Gmm por cada giro.

N° Giros	Altura de la probeta			Gmb x giro (kgf/m ³)	%Gmm (%)
	Mezcla 1	Mezcla 2	PROM 4,7%		
1	135,3	134,9	135,1	1974,1	81,4%
2	133,2	133,0	133,1	2003,8	82,6%
3	131,4	131,4	131,4	2029,7	83,7%
4	130,1	130,1	130,1	2050,0	84,5%
5	129,1	129,1	129,1	2065,9	85,2%
6	128,1	128,2	128,2	2081,2	85,8%
7	127,4	127,5	127,5	2092,6	86,3%
8	126,6	126,8	126,7	2105,0	86,8%
9	126,1	126,2	126,2	2114,2	87,1%
10	125,6	125,8	125,7	2121,7	87,5%
11	125,1	125,3	125,2	2130,2	87,8%
12	124,7	124,9	124,8	2137,0	88,1%
13	124,3	124,6	124,5	2143,0	88,3%
14	124,0	124,2	124,1	2149,1	88,6%
15	123,7	123,9	123,8	2154,3	88,8%
16	123,3	123,6	123,5	2160,4	89,1%
17	123,1	123,3	123,2	2164,8	89,2%
18	122,8	123,1	123,0	2169,2	89,4%
19	122,5	122,8	122,7	2174,5	89,6%
20	122,3	122,6	122,5	2178,1	89,8%
21	122,1	122,4	122,3	2181,6	89,9%
22	121,9	122,1	122,0	2186,1	90,1%
23	121,6	121,9	121,8	2190,6	90,3%
24	121,5	121,8	121,7	2192,4	90,4%
25	121,3	121,6	121,5	2196,0	90,5%
26	121,1	121,4	121,3	2199,6	90,7%
27	121,0	121,2	121,1	2202,3	90,8%
28	120,8	121,1	121,0	2205,1	90,9%
29	120,6	120,9	120,8	2208,7	91,0%
30	120,5	120,8	120,7	2210,5	91,1%
31	120,3	120,7	120,5	2213,3	91,2%
32	120,2	120,5	120,4	2216,1	91,3%
33	120,1	120,4	120,3	2217,9	91,4%
34	119,9	120,2	120,1	2221,6	91,6%
35	119,8	120,1	120,0	2223,4	91,7%
36	119,7	120,0	119,9	2225,3	91,7%
37	119,6	119,9	119,8	2227,2	91,8%
38	119,5	119,8	119,7	2229,0	91,9%

39	119,4	119,7	119,6	2230,9	92,0%
40	119,3	119,6	119,5	2232,8	92,0%
41	119,2	119,5	119,4	2234,6	92,1%
42	119,1	119,4	119,3	2236,5	92,2%
43	119,0	119,3	119,2	2238,4	92,3%
44	118,9	119,2	119,1	2240,3	92,3%
45	118,8	119,1	119,0	2242,1	92,4%
46	118,7	119,0	118,9	2244,0	92,5%
47	118,6	118,9	118,8	2245,9	92,6%
48	118,5	118,8	118,7	2247,8	92,7%
49	118,4	118,7	118,6	2249,7	92,7%
50	118,3	118,7	118,5	2250,7	92,8%
51	118,3	118,6	118,5	2251,6	92,8%
52	118,2	118,5	118,4	2253,5	92,9%
53	118,1	118,4	118,3	2255,4	93,0%
54	118,0	118,3	118,2	2257,3	93,1%
55	118,0	118,3	118,2	2257,3	93,1%
56	117,9	118,2	118,1	2259,2	93,1%
57	117,8	118,1	118,0	2261,1	93,2%
58	117,8	118,1	118,0	2261,1	93,2%
59	117,7	118,0	117,9	2263,1	93,3%
60	117,6	117,9	117,8	2265,0	93,4%
61	117,6	117,9	117,8	2265,0	93,4%
62	117,5	117,8	117,7	2266,9	93,4%
63	117,5	117,8	117,7	2266,9	93,4%
64	117,4	117,7	117,6	2268,8	93,5%
65	117,3	117,6	117,5	2270,8	93,6%
66	117,3	117,6	117,5	2270,8	93,6%
67	117,2	117,5	117,4	2272,7	93,7%
68	117,2	117,5	117,4	2272,7	93,7%
69	117,1	117,4	117,3	2274,6	93,8%
70	117,0	117,3	117,2	2276,6	93,8%
71	117,0	117,3	117,2	2276,6	93,8%
72	116,9	117,2	117,1	2278,5	93,9%
73	116,9	117,2	117,1	2278,5	93,9%
74	116,8	117,1	117,0	2280,5	94,0%
75	116,8	117,1	117,0	2280,5	94,0%
76	116,7	117,0	116,9	2282,4	94,1%
77	116,7	117,0	116,9	2282,4	94,1%
78	116,6	116,9	116,8	2284,4	94,2%
79	116,6	116,9	116,8	2284,4	94,2%
80	116,5	116,8	116,7	2286,3	94,2%
81	116,5	116,8	116,7	2286,3	94,2%
82	116,5	116,7	116,6	2287,3	94,3%
83	116,4	116,7	116,6	2288,3	94,3%
84	116,4	116,7	116,6	2288,3	94,3%
85	116,3	116,6	116,5	2290,3	94,4%

86	116,3	116,6	116,5	2290,3	94,4%
87	116,2	116,5	116,4	2292,2	94,5%
88	116,2	116,5	116,4	2292,2	94,5%
89	116,2	116,4	116,3	2293,2	94,5%
90	116,1	116,4	116,3	2294,2	94,6%
91	116,1	116,4	116,3	2294,2	94,6%
92	116,1	116,3	116,2	2295,2	94,6%
93	116,0	116,3	116,2	2296,2	94,7%
94	116,0	116,3	116,2	2296,2	94,7%
95	116,0	116,2	116,1	2297,2	94,7%
96	115,9	116,2	116,1	2298,2	94,7%
97	115,9	116,1	116,0	2299,2	94,8%
98	115,8	116,1	116,0	2300,1	94,8%
99	115,8	116,1	116,0	2300,1	94,8%
100	115,8	116,0	115,9	2301,1	94,9%
101	115,8	116,0	115,9	2301,1	94,9%
102	115,7	116,0	115,9	2302,1	94,9%
103	115,7	116,0	115,9	2302,1	94,9%
104	115,7	115,9	115,8	2303,1	94,9%
105	115,6	115,9	115,8	2304,1	95,0%
106	115,6	115,9	115,8	2304,1	95,0%
107	115,6	115,8	115,7	2305,1	95,0%
108	115,5	115,8	115,7	2306,1	95,1%
109	115,5	115,8	115,7	2306,1	95,1%
110	115,5	115,7	115,6	2307,1	95,1%
111	115,4	115,7	115,6	2308,1	95,1%
112	115,4	115,7	115,6	2308,1	95,1%
113	115,4	115,6	115,5	2309,1	95,2%
114	115,3	115,6	115,5	2310,1	95,2%
115	115,3	115,6	115,5	2310,1	95,2%
116	115,3	115,5	115,4	2311,1	95,3%
117	115,3	115,5	115,4	2311,1	95,3%
118	115,2	115,5	115,4	2312,1	95,3%
119	115,2	115,5	115,4	2312,1	95,3%
120	115,2	115,4	115,3	2313,1	95,4%
121	115,1	115,4	115,3	2314,1	95,4%
122	115,1	115,4	115,3	2314,1	95,4%
123	115,1	115,4	115,3	2314,1	95,4%
124	115,1	115,3	115,2	2315,1	95,4%
125	115,0	115,3	115,2	2316,1	95,5%
126	115,0	115,3	115,2	2316,1	95,5%
127	115,0	115,2	115,1	2317,1	95,5%
128	115,0	115,2	115,1	2317,1	95,5%
129	114,9	115,2	115,1	2318,1	95,6%
130	114,9	115,2	115,1	2318,1	95,6%
131	114,9	115,1	115,0	2319,2	95,6%
132	114,9	115,1	115,0	2319,2	95,6%

133	114,8	115,1	115,0	2320,2	95,6%
134	114,8	115,1	115,0	2320,2	95,6%
135	114,8	115,1	115,0	2320,2	95,6%
136	114,8	115,0	114,9	2321,2	95,7%
137	114,7	115,0	114,9	2322,2	95,7%
138	114,7	115,0	114,9	2322,2	95,7%
139	114,7	115,0	114,9	2322,2	95,7%
140	114,7	114,9	114,8	2323,2	95,8%
141	114,7	114,9	114,8	2323,2	95,8%
142	114,6	114,9	114,8	2324,2	95,8%
143	114,6	114,9	114,8	2324,2	95,8%
144	114,6	114,9	114,8	2324,2	95,8%
145	114,6	114,8	114,7	2325,2	95,8%
146	114,5	114,8	114,7	2326,2	95,9%
147	114,5	114,8	114,7	2326,2	95,9%
148	114,5	114,8	114,7	2326,2	95,9%
149	114,5	114,7	114,6	2327,2	95,9%
150	114,5	114,7	114,6	2327,2	95,9%
151	114,4	114,7	114,6	2328,3	96,0%
152	114,4	114,7	114,6	2328,3	96,0%
153	114,4	114,7	114,6	2328,3	96,0%
154	114,4	114,6	114,5	2329,3	96,0%
155	114,4	114,6	114,5	2329,3	96,0%
156	114,3	114,6	114,5	2330,3	96,1%
157	114,3	114,6	114,5	2330,3	96,1%
158	114,3	114,6	114,5	2330,3	96,1%
159	114,3	114,6	114,5	2330,3	96,1%
160	114,3	114,5	114,4	2331,3	96,1%

Gráfico de compactación Altura v/s N Giros

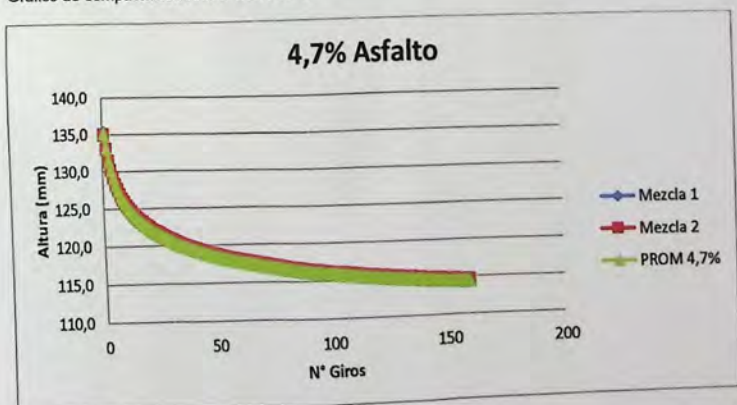
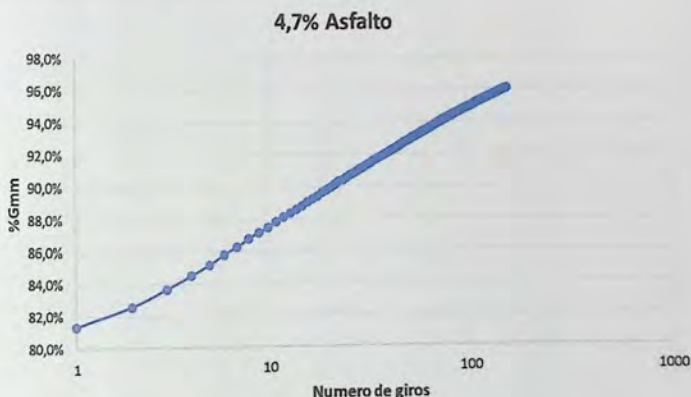


Gráfico %Gmm promedio v/s N Giros



Ligante asfáltico 5,2%

Datos obtenidos por el compactador giratorio y cálculos de Gmb y %Gmm por cada giro.

N° Giros	Altura de la probeta			Gmb x giro	%Gmm
	Mezcla 3	Mezcla 4	PROM 5,2%		
1	135,7	135,5	135,6	1969,7	81,7%
2	133,5	133,3	133,4	2002,2	83,1%
3	131,9	131,7	131,8	2026,5	84,1%
4	130,7	130,4	130,6	2045,9	84,9%
5	129,5	129,2	129,4	2064,9	85,7%
6	128,7	128,3	128,5	2078,6	86,3%
7	127,9	127,6	127,8	2090,8	86,8%
8	127,2	126,9	127,1	2102,3	87,2%
9	126,7	126,3	126,5	2111,4	87,6%
10	126,1	125,8	126,0	2120,6	88,0%
11	125,6	125,3	125,5	2129,1	88,4%
12	125,2	124,9	125,1	2135,9	88,6%
13	124,8	124,5	124,7	2142,8	88,9%
14	124,5	124,1	124,3	2148,8	89,2%
15	124,1	123,8	124,0	2154,9	89,4%
16	123,8	123,5	123,7	2160,1	89,6%
17	123,5	123,2	123,4	2165,3	89,9%
18	123,2	122,9	123,1	2170,6	90,1%
19	122,9	122,6	122,8	2175,9	90,3%

20	122,7	122,4	122,6	2179,5	90,5%
21	122,4	122,2	122,3	2183,9	90,6%
22	122,2	122,0	122,1	2187,5	90,8%
23	122,0	121,7	121,9	2192,0	91,0%
24	121,8	121,6	121,7	2194,7	91,1%
25	121,6	121,4	121,5	2198,3	91,2%
26	121,4	121,2	121,3	2201,9	91,4%
27	121,2	121,0	121,1	2205,6	91,5%
28	121,0	120,8	120,9	2209,2	91,7%
29	120,9	120,7	120,8	2211,1	91,8%
30	120,7	120,6	120,7	2213,8	91,9%
31	120,6	120,4	120,5	2216,6	92,0%
32	120,4	120,3	120,4	2219,3	92,1%
33	120,3	120,1	120,2	2222,1	92,2%
34	120,1	120,0	120,1	2224,9	92,3%
35	120,0	119,9	120,0	2226,7	92,4%
36	119,9	119,7	119,8	2229,5	92,5%
37	119,7	119,6	119,7	2232,3	92,6%
38	119,6	119,5	119,6	2234,2	92,7%
39	119,5	119,4	119,5	2236,0	92,8%
40	119,4	119,3	119,4	2237,9	92,9%
41	119,3	119,2	119,3	2239,8	93,0%
42	119,2	119,1	119,2	2241,7	93,0%
43	119,0	119,0	119,0	2244,5	93,2%
44	119,0	118,9	119,0	2245,4	93,2%
45	118,8	118,8	118,8	2248,3	93,3%
46	118,8	118,7	118,8	2249,2	93,3%
47	118,7	118,6	118,7	2251,1	93,4%
48	118,6	118,5	118,6	2253,0	93,5%
49	118,5	118,4	118,5	2254,9	93,6%
50	118,4	118,3	118,4	2256,8	93,7%
51	118,3	118,2	118,3	2258,7	93,7%
52	118,2	118,1	118,2	2260,6	93,8%
53	118,1	118,1	118,1	2261,6	93,9%
54	118,1	118,0	118,1	2262,6	93,9%
55	118,0	117,9	118,0	2264,5	94,0%
56	117,9	117,8	117,9	2266,4	94,1%
57	117,8	117,8	117,8	2267,4	94,1%
58	117,8	117,7	117,8	2268,3	94,1%
59	117,7	117,6	117,7	2270,3	94,2%
60	117,6	117,6	117,6	2271,2	94,3%
61	117,5	117,5	117,5	2273,2	94,3%
62	117,5	117,4	117,5	2274,1	94,4%
63	117,4	117,3	117,4	2276,1	94,5%
64	117,3	117,3	117,3	2277,0	94,5%
65	117,3	117,2	117,3	2278,0	94,5%
66	117,2	117,2	117,2	2279,0	94,6%

67	117,1	117,1	117,1	2280,9	94,7%
68	117,1	117,0	117,1	2281,9	94,7%
69	117,0	117,0	117,0	2282,9	94,7%
70	117,0	116,9	117,0	2283,8	94,8%
71	116,9	116,9	116,9	2284,8	94,8%
72	116,8	116,8	116,8	2286,8	94,9%
73	116,8	116,7	116,8	2287,8	94,9%
74	116,7	116,7	116,7	2288,7	95,0%
75	116,7	116,6	116,7	2289,7	95,0%
76	116,6	116,6	116,6	2290,7	95,1%
77	116,6	116,5	116,6	2291,7	95,1%
78	116,5	116,5	116,5	2292,7	95,2%
79	116,5	116,4	116,5	2293,6	95,2%
80	116,4	116,4	116,4	2294,6	95,2%
81	116,4	116,3	116,4	2295,6	95,3%
82	116,3	116,3	116,3	2296,6	95,3%
83	116,3	116,2	116,3	2297,6	95,4%
84	116,2	116,2	116,2	2298,6	95,4%
85	116,2	116,1	116,2	2299,6	95,4%
86	116,1	116,1	116,1	2300,6	95,5%
87	116,1	116,1	116,1	2300,6	95,5%
88	116,0	116,0	116,0	2302,5	95,6%
89	116,0	116,0	116,0	2302,5	95,6%
90	116,0	115,9	116,0	2303,5	95,6%
91	115,9	115,9	115,9	2304,5	95,6%
92	115,9	115,8	115,9	2305,5	95,7%
93	115,8	115,8	115,8	2306,5	95,7%
94	115,8	115,8	115,8	2306,5	95,7%
95	115,7	115,7	115,7	2308,5	95,8%
96	115,7	115,7	115,7	2308,5	95,8%
97	115,7	115,7	115,7	2308,5	95,8%
98	115,6	115,6	115,6	2310,5	95,9%
99	115,6	115,6	115,6	2310,5	95,9%
100	115,5	115,5	115,5	2312,5	96,0%
101	115,5	115,5	115,5	2312,5	96,0%
102	115,5	115,5	115,5	2312,5	96,0%
103	115,4	115,4	115,4	2314,5	96,1%
104	115,4	115,4	115,4	2314,5	96,1%
105	115,4	115,4	115,4	2314,5	96,1%
106	115,3	115,3	115,3	2316,5	96,1%
107	115,3	115,3	115,3	2316,5	96,1%
108	115,2	115,3	115,3	2317,5	96,2%
109	115,2	115,2	115,2	2318,5	96,2%
110	115,2	115,2	115,2	2318,5	96,2%
111	115,1	115,1	115,1	2320,6	96,3%
112	115,1	115,1	115,1	2320,6	96,3%
113	115,1	115,1	115,1	2320,6	96,3%

114	115,0	115,1	115,1	2321,6	96,3%
115	115,0	115,0	115,0	2322,6	96,4%
116	115,0	115,0	115,0	2322,6	96,4%
117	115,0	115,0	115,0	2322,6	96,4%
118	114,9	114,9	114,9	2324,6	96,5%
119	114,9	114,9	114,9	2324,6	96,5%
120	114,9	114,9	114,9	2324,6	96,5%
121	114,8	114,8	114,8	2326,6	96,6%
122	114,8	114,8	114,8	2326,6	96,6%
123	114,8	114,8	114,8	2326,6	96,6%
124	114,7	114,8	114,8	2327,6	96,6%
125	114,7	114,7	114,7	2328,6	96,6%
126	114,7	114,7	114,7	2328,6	96,6%
127	114,7	114,7	114,7	2328,6	96,6%
128	114,6	114,6	114,6	2330,7	96,7%
129	114,6	114,6	114,6	2330,7	96,7%
130	114,6	114,6	114,6	2330,7	96,7%
131	114,6	114,6	114,6	2330,7	96,7%
132	114,5	114,5	114,5	2332,7	96,8%
133	114,5	114,5	114,5	2332,7	96,8%
134	114,5	114,5	114,5	2332,7	96,8%
135	114,4	114,5	114,5	2333,7	96,9%
136	114,4	114,4	114,4	2334,8	96,9%
137	114,4	114,4	114,4	2334,8	96,9%
138	114,4	114,4	114,4	2334,8	96,9%
139	114,3	114,4	114,4	2335,8	96,9%
140	114,3	114,3	114,3	2336,8	97,0%
141	114,3	114,3	114,3	2336,8	97,0%
142	114,3	114,3	114,3	2336,8	97,0%
143	114,2	114,3	114,3	2337,8	97,0%
144	114,2	114,2	114,2	2338,8	97,1%
145	114,2	114,2	114,2	2338,8	97,1%
146	114,2	114,2	114,2	2338,8	97,1%
147	114,2	114,2	114,2	2338,8	97,1%
148	114,1	114,1	114,1	2340,9	97,2%
149	114,1	114,1	114,1	2340,9	97,2%
150	114,1	114,1	114,1	2340,9	97,2%
151	114,1	114,1	114,1	2340,9	97,2%
152	114,0	114,1	114,1	2341,9	97,2%
153	114,0	114,0	114,0	2342,9	97,2%
154	114,0	114,0	114,0	2342,9	97,2%
155	114,0	114,0	114,0	2342,9	97,2%
156	114,0	114,0	114,0	2342,9	97,2%
157	113,9	114,0	114,0	2344,0	97,3%
158	113,9	113,9	113,9	2345,0	97,3%
159	113,9	113,9	113,9	2345,0	97,3%
160	113,9	113,9	113,9	2345,0	97,3%

Gráfico de compactación Altura v/s N Giros

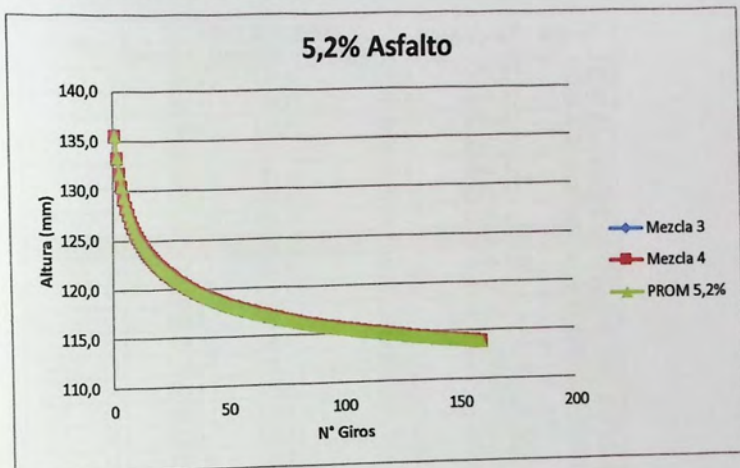
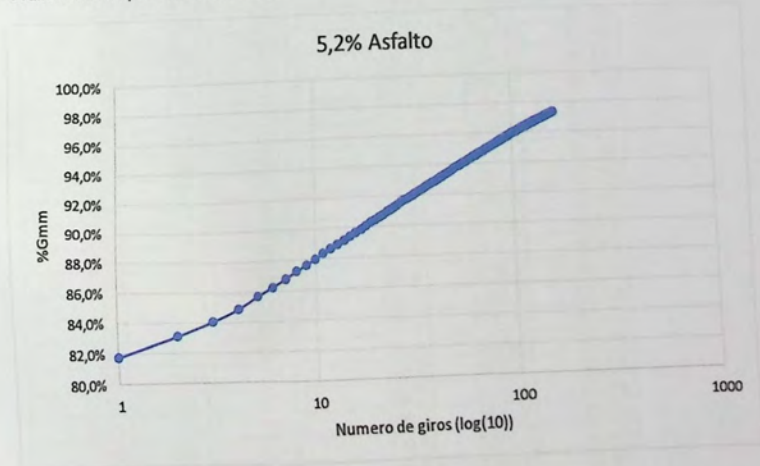


Gráfico %Gmm promedio v/s N Giros



Ligante asfáltico 5,7%

Datos obtenidos por el compactador giratorio y cálculos de Gmb y %Gmm por cada giro.

N° Giros	Altura de la probeta			Gmb x giro	%Gmm
	Mezcla 5	Mezcla 6	PROM 5,7%		
1	134,4	137,1	135,8	1973,2	82,4%
2	132,5	135,2	133,9	2001,2	83,6%
3	130,9	133,6	132,3	2025,4	84,6%
4	129,5	132,2	130,9	2047,1	85,5%
5	128,5	131,2	129,9	2062,9	86,2%
6	127,7	130,4	129,1	2075,6	86,7%
7	126,9	129,6	128,3	2088,6	87,3%
8	126,2	128,9	127,6	2100,1	87,7%
9	125,7	128,4	127,1	2108,3	88,1%
10	125,1	127,8	126,5	2118,3	88,5%
11	124,6	127,3	126,0	2126,7	88,9%
12	124,2	126,9	125,6	2133,5	89,1%
13	123,8	126,5	125,2	2140,3	89,4%
14	123,5	126,2	124,9	2145,5	89,6%
15	123,1	125,8	124,5	2152,4	89,9%
16	122,8	125,5	124,2	2157,6	90,1%
17	122,5	125,2	123,9	2162,8	90,4%
18	122,2	124,9	123,6	2168,0	90,6%
19	122,0	124,7	123,4	2171,6	90,7%
20	121,7	124,4	123,1	2176,9	90,9%
21	121,5	124,2	122,9	2180,4	91,1%
22	121,3	124,0	122,7	2184,0	91,2%
23	121,1	123,8	122,5	2187,5	91,4%
24	120,9	123,6	122,3	2191,1	91,5%
25	120,7	123,4	122,1	2194,7	91,7%
26	120,5	123,2	121,9	2198,3	91,8%
27	120,3	123,0	121,7	2201,9	92,0%
28	120,2	122,9	121,6	2203,7	92,1%
29	120,0	122,7	121,4	2207,4	92,2%
30	119,8	122,5	121,2	2211,0	92,4%
31	119,7	122,4	121,1	2212,8	92,5%
32	119,5	122,2	120,9	2216,5	92,6%
33	119,4	122,1	120,8	2218,3	92,7%
34	119,3	122,0	120,7	2220,2	92,8%
35	119,1	121,8	120,5	2223,8	92,9%
36	119,0	121,7	120,4	2225,7	93,0%
37	118,9	121,6	120,3	2227,5	93,1%
38	118,8	121,5	120,2	2229,4	93,1%
39	118,6	121,3	120,0	2233,1	93,3%
40	118,5	121,2	119,9	2235,0	93,4%
41	118,4	121,1	119,8	2236,8	93,5%
42	118,3	121,0	119,7	2238,7	93,5%

43	118,2	120,9	119,6	2240,6	93,6%
44	118,1	120,8	119,5	2242,5	93,7%
45	118,0	120,7	119,4	2244,3	93,8%
46	117,9	120,6	119,3	2246,2	93,8%
47	117,8	120,5	119,2	2248,1	93,9%
48	117,7	120,4	119,1	2250,0	94,0%
49	117,7	120,4	119,1	2250,0	94,0%
50	117,6	120,3	119,0	2251,9	94,1%
51	117,5	120,2	118,9	2253,8	94,2%
52	117,4	120,1	118,8	2255,7	94,2%
53	117,3	120,0	118,7	2257,6	94,3%
54	117,2	119,9	118,6	2259,5	94,4%
55	117,2	119,9	118,6	2259,5	94,4%
56	117,1	119,8	118,5	2261,4	94,5%
57	117,0	119,7	118,4	2263,3	94,6%
58	116,9	119,6	118,3	2265,2	94,6%
59	116,9	119,6	118,3	2265,2	94,6%
60	116,8	119,5	118,2	2267,1	94,7%
61	116,7	119,4	118,1	2269,1	94,8%
62	116,7	119,4	118,1	2269,1	94,8%
63	116,6	119,3	118,0	2271,0	94,9%
64	116,5	119,2	117,9	2272,9	95,0%
65	116,5	119,2	117,9	2272,9	95,0%
66	116,4	119,1	117,8	2274,8	95,0%
67	116,3	119,0	117,7	2276,8	95,1%
68	116,3	119,0	117,7	2276,8	95,1%
69	116,2	118,9	117,6	2278,7	95,2%
70	116,2	118,9	117,6	2278,7	95,2%
71	116,1	118,8	117,5	2280,7	95,3%
72	116,0	118,7	117,4	2282,6	95,4%
73	116,0	118,7	117,4	2282,6	95,4%
74	115,9	118,6	117,3	2284,5	95,4%
75	115,9	118,6	117,3	2284,5	95,4%
76	115,8	118,5	117,2	2286,5	95,5%
77	115,8	118,5	117,2	2286,5	95,5%
78	115,7	118,4	117,1	2288,4	95,6%
79	115,7	118,4	117,1	2288,4	95,6%
80	115,6	118,3	117,0	2290,4	95,7%
81	115,6	118,3	117,0	2290,4	95,7%
82	115,5	118,2	116,9	2292,4	95,8%
83	115,5	118,2	116,9	2292,4	95,8%
84	115,5	118,2	116,9	2292,4	95,8%
85	115,4	118,1	116,8	2294,3	95,9%
86	115,4	118,1	116,8	2294,3	95,9%
87	115,3	118,0	116,7	2296,3	95,9%
88	115,3	118,0	116,7	2296,3	95,9%
89	115,2	117,9	116,6	2298,3	96,0%

90	115,2	117,9	116,6	2298,3	96,0%
91	115,1	117,8	116,5	2300,2	96,1%
92	115,1	117,8	116,5	2300,2	96,1%
93	115,1	117,8	116,5	2300,2	96,1%
94	115,0	117,7	116,4	2302,2	96,2%
95	115,0	117,7	116,4	2302,2	96,2%
96	114,9	117,6	116,3	2304,2	96,3%
97	114,9	117,6	116,3	2304,2	96,3%
98	114,9	117,6	116,3	2304,2	96,3%
99	114,8	117,5	116,2	2306,2	96,4%
100	114,8	117,5	116,2	2306,2	96,4%
101	114,8	117,5	116,2	2306,2	96,4%
102	114,7	117,4	116,1	2308,2	96,4%
103	114,7	117,4	116,1	2308,2	96,4%
104	114,6	117,3	116,0	2310,2	96,5%
105	114,6	117,3	116,0	2310,2	96,5%
106	114,6	117,3	116,0	2310,2	96,5%
107	114,5	117,2	115,9	2312,1	96,6%
108	114,5	117,2	115,9	2312,1	96,6%
109	114,5	117,2	115,9	2312,1	96,6%
110	114,4	117,1	115,8	2314,1	96,7%
111	114,4	117,1	115,8	2314,1	96,7%
112	114,4	117,1	115,8	2314,1	96,7%
113	114,3	117,0	115,7	2316,1	96,8%
114	114,3	117,0	115,7	2316,1	96,8%
115	114,3	117,0	115,7	2316,1	96,8%
116	114,2	116,9	115,6	2318,2	96,9%
117	114,2	116,9	115,6	2318,2	96,9%
118	114,2	116,9	115,6	2318,2	96,9%
119	114,2	116,9	115,6	2318,2	96,9%
120	114,1	116,8	115,5	2320,2	96,9%
121	114,1	116,8	115,5	2320,2	96,9%
122	114,1	116,8	115,5	2320,2	96,9%
123	114,0	116,7	115,4	2322,2	97,0%
124	114,0	116,7	115,4	2322,2	97,0%
125	114,0	116,7	115,4	2322,2	97,0%
126	114,0	116,7	115,4	2322,2	97,0%
127	113,9	116,6	115,3	2324,2	97,1%
128	113,9	116,6	115,3	2324,2	97,1%
129	113,9	116,6	115,3	2324,2	97,1%
130	113,8	116,5	115,2	2326,2	97,2%
131	113,8	116,5	115,2	2326,2	97,2%
132	113,8	116,5	115,2	2326,2	97,2%
133	113,8	116,5	115,2	2326,2	97,2%
134	113,7	116,4	115,1	2328,2	97,3%
135	113,7	116,4	115,1	2328,2	97,3%
136	113,7	116,4	115,1	2328,2	97,3%

137	113,7	116,4	115,1	2328,2	97,3%
138	113,6	116,3	115,0	2330,3	97,4%
139	113,6	116,3	115,0	2330,3	97,4%
140	113,6	116,3	115,0	2330,3	97,4%
141	113,6	116,3	115,0	2330,3	97,4%
142	113,5	116,2	114,9	2332,3	97,4%
143	113,5	116,2	114,9	2332,3	97,4%
144	113,5	116,2	114,9	2332,3	97,4%
145	113,5	116,2	114,9	2332,3	97,4%
146	113,4	116,1	114,8	2334,3	97,5%
147	113,4	116,1	114,8	2334,3	97,5%
148	113,4	116,1	114,8	2334,3	97,5%
149	113,4	116,1	114,8	2334,3	97,5%
150	113,4	116,1	114,8	2334,3	97,5%
151	113,3	116,0	114,7	2336,3	97,6%
152	113,3	116,0	114,7	2336,3	97,6%
153	113,3	116,0	114,7	2336,3	97,6%
154	113,3	116,0	114,7	2336,3	97,6%
155	113,3	116,0	114,7	2336,3	97,6%
156	113,2	115,9	114,6	2338,4	97,7%
157	113,2	115,9	114,6	2338,4	97,7%
158	113,2	115,9	114,6	2338,4	97,7%
159	113,2	115,9	114,6	2338,4	97,7%
160	113,2	115,9	114,6	2338,4	97,7%

Gráfico de compactación Altura v/s N Giros

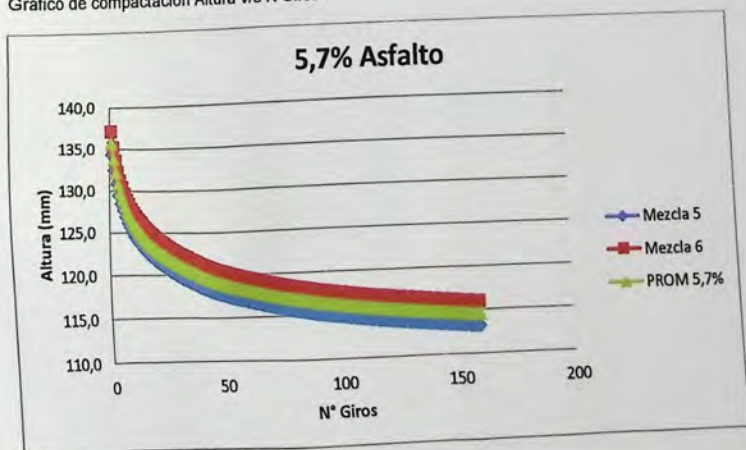
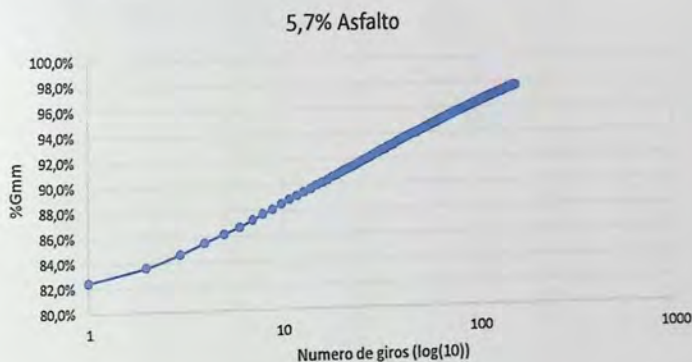


Gráfico %Gmm promedio v/s N Giros



Ligante asfáltico 6,2%

Datos obtenidos por el compactador giratorio y cálculos de Gmb y %Gmm por cada giro.

N° Giros	Altura de la probeta			Gmb x giro	%Gmm
	Mezcla 7	Mezcla 8	PROM 6,2%		
1	134,6	135,7	135,2	1953,1	82,1%
2	132,7	133,5	133,1	1983,1	83,4%
3	131,1	131,9	131,5	2007,3	84,4%
4	129,7	130,7	130,2	2027,3	85,3%
5	128,6	129,5	129,1	2045,4	86,0%
6	127,7	128,7	128,2	2058,9	86,6%
7	126,9	127,9	127,4	2071,9	87,1%
8	126,3	127,2	126,8	2082,5	87,6%
9	125,6	126,7	126,2	2092,4	88,0%
10	125,1	126,1	125,6	2101,6	88,4%
11	124,6	125,6	125,1	2110,0	88,7%
12	124,2	125,2	124,7	2116,7	89,0%
13	123,8	124,8	124,3	2123,5	89,3%
14	123,4	124,5	124,0	2129,5	89,6%
15	123,1	124,1	123,6	2135,6	89,8%
16	122,7	123,8	123,3	2141,6	90,1%
17	122,4	123,5	123,0	2146,8	90,3%
18	122,2	123,2	122,7	2151,2	90,5%
19	121,9	122,9	122,4	2156,5	90,7%

20	121,6	122,7	122,2	2160,9	90,9%
21	121,4	122,4	121,9	2165,3	91,1%
22	121,2	122,2	121,7	2168,9	91,2%
23	121,0	122,0	121,5	2172,5	91,4%
24	120,7	121,8	121,3	2176,9	91,6%
25	120,6	121,6	121,1	2179,6	91,7%
26	120,4	121,4	120,9	2183,3	91,8%
27	120,2	121,2	120,7	2186,9	92,0%
28	120,0	121,0	120,5	2190,5	92,1%
29	119,8	120,9	120,4	2193,2	92,2%
30	119,7	120,7	120,2	2196,0	92,4%
31	119,5	120,6	120,1	2198,7	92,5%
32	119,4	120,4	119,9	2201,5	92,6%
33	119,2	120,3	119,8	2204,2	92,7%
34	119,1	120,1	119,6	2207,0	92,8%
35	118,9	120,0	119,5	2209,8	92,9%
36	118,8	119,9	119,4	2211,6	93,0%
37	118,7	119,7	119,2	2214,4	93,1%
38	118,6	119,6	119,1	2216,2	93,2%
39	118,4	119,5	119,0	2219,0	93,3%
40	118,3	119,4	118,9	2220,9	93,4%
41	118,2	119,3	118,8	2222,8	93,5%
42	118,1	119,2	118,7	2224,7	93,6%
43	118,0	119,0	118,5	2227,5	93,7%
44	117,9	119,0	118,5	2228,4	93,7%
45	117,8	118,8	118,3	2231,2	93,8%
46	117,7	118,8	118,3	2232,2	93,9%
47	117,6	118,7	118,2	2234,1	94,0%
48	117,5	118,6	118,1	2236,0	94,0%
49	117,4	118,5	118,0	2237,9	94,1%
50	117,3	118,4	117,9	2239,8	94,2%
51	117,2	118,3	117,8	2241,7	94,3%
52	117,1	118,2	117,7	2243,6	94,4%
53	117,0	118,1	117,6	2245,5	94,4%
54	117,0	118,1	117,6	2245,5	94,4%
55	116,9	118,0	117,5	2247,4	94,5%
56	116,8	117,9	117,4	2249,3	94,6%
57	116,7	117,8	117,3	2251,2	94,7%
58	116,7	117,8	117,3	2251,2	94,7%
59	116,6	117,7	117,2	2253,1	94,8%
60	116,5	117,6	117,1	2255,1	94,8%
61	116,4	117,5	117,0	2257,0	94,9%
62	116,4	117,5	117,0	2257,0	94,9%
63	116,3	117,4	116,9	2258,9	95,0%
64	116,2	117,3	116,8	2260,9	95,1%
65	116,2	117,3	116,8	2260,9	95,1%
66	116,1	117,2	116,7	2262,8	95,2%

67	116,0	117,1	116,6	2264,7	95,2%
68	116,0	117,1	116,6	2264,7	95,2%
69	115,9	117,0	116,5	2266,7	95,3%
70	115,8	117,0	116,4	2267,7	95,4%
71	115,8	116,9	116,4	2268,6	95,4%
72	115,7	116,8	116,3	2270,6	95,5%
73	115,7	116,8	116,3	2270,6	95,5%
74	115,6	116,7	116,2	2272,5	95,6%
75	115,6	116,7	116,2	2272,5	95,6%
76	115,5	116,6	116,1	2274,5	95,7%
77	115,5	116,6	116,1	2274,5	95,7%
78	115,4	116,5	116,0	2276,5	95,7%
79	115,4	116,5	116,0	2276,5	95,7%
80	115,3	116,4	115,9	2278,4	95,8%
81	115,3	116,4	115,9	2278,4	95,8%
82	115,2	116,3	115,8	2280,4	95,9%
83	115,2	116,3	115,8	2280,4	95,9%
84	115,1	116,2	115,7	2282,4	96,0%
85	115,1	116,2	115,7	2282,4	96,0%
86	115,0	116,1	115,6	2284,3	96,1%
87	115,0	116,1	115,6	2284,3	96,1%
88	114,9	116,0	115,5	2286,3	96,2%
89	114,9	116,0	115,5	2286,3	96,2%
90	114,8	116,0	115,4	2287,3	96,2%
91	114,8	115,9	115,4	2288,3	96,2%
92	114,8	115,9	115,4	2288,3	96,2%
93	114,7	115,8	115,3	2290,3	96,3%
94	114,7	115,8	115,3	2290,3	96,3%
95	114,6	115,7	115,2	2292,3	96,4%
96	114,6	115,7	115,2	2292,3	96,4%
97	114,6	115,7	115,2	2292,3	96,4%
98	114,5	115,6	115,1	2294,3	96,5%
99	114,5	115,6	115,1	2294,3	96,5%
100	114,4	115,5	115,0	2296,3	96,6%
101	114,4	115,5	115,0	2296,3	96,6%
102	114,4	115,5	115,0	2296,3	96,6%
103	114,3	115,4	114,9	2298,3	96,7%
104	114,3	115,4	114,9	2298,3	96,7%
105	114,3	115,4	114,9	2298,3	96,7%
106	114,2	115,3	114,8	2300,3	96,7%
107	114,2	115,3	114,8	2300,3	96,7%
108	114,2	115,2	114,7	2301,3	96,8%
109	114,1	115,2	114,7	2302,3	96,8%
110	114,1	115,2	114,7	2302,3	96,8%
111	114,1	115,1	114,6	2303,3	96,9%
112	114,0	115,1	114,6	2304,3	96,9%
113	114,0	115,1	114,6	2304,3	96,9%

114	114,0	115,0	114,5	2305,3	96,9%
115	113,9	115,0	114,5	2306,3	97,0%
116	113,9	115,0	114,5	2306,3	97,0%
117	113,9	115,0	114,5	2306,3	97,0%
118	113,9	114,9	114,4	2307,3	97,0%
119	113,8	114,9	114,4	2308,3	97,1%
120	113,8	114,9	114,4	2308,3	97,1%
121	113,8	114,8	114,3	2309,3	97,1%
122	113,7	114,8	114,3	2310,3	97,2%
123	113,7	114,8	114,3	2310,3	97,2%
124	113,7	114,7	114,2	2311,3	97,2%
125	113,6	114,7	114,2	2312,4	97,2%
126	113,6	114,7	114,2	2312,4	97,2%
127	113,6	114,7	114,2	2312,4	97,2%
128	113,6	114,6	114,1	2313,4	97,3%
129	113,5	114,6	114,1	2314,4	97,3%
130	113,5	114,6	114,1	2314,4	97,3%
131	113,5	114,6	114,1	2314,4	97,3%
132	113,5	114,5	114,0	2315,4	97,4%
133	113,4	114,5	114,0	2316,4	97,4%
134	113,4	114,5	114,0	2316,4	97,4%
135	113,4	114,4	113,9	2317,4	97,5%
136	113,4	114,4	113,9	2317,4	97,5%
137	113,3	114,4	113,9	2318,4	97,5%
138	113,3	114,4	113,9	2318,4	97,5%
139	113,3	114,3	113,8	2319,5	97,5%
140	113,3	114,3	113,8	2319,5	97,5%
141	113,2	114,3	113,8	2320,5	97,6%
142	113,2	114,3	113,8	2320,5	97,6%
143	113,2	114,2	113,7	2321,5	97,6%
144	113,2	114,2	113,7	2321,5	97,6%
145	113,1	114,2	113,7	2322,5	97,7%
146	113,1	114,2	113,7	2322,5	97,7%
147	113,1	114,2	113,7	2322,5	97,7%
148	113,1	114,1	113,6	2323,5	97,7%
149	113,1	114,1	113,6	2323,5	97,7%
150	113,0	114,1	113,6	2324,6	97,8%
151	113,0	114,1	113,6	2324,6	97,8%
152	113,0	114,0	113,5	2325,6	97,8%
153	113,0	114,0	113,5	2325,6	97,8%
154	112,9	114,0	113,5	2326,6	97,8%
155	112,9	114,0	113,5	2326,6	97,8%
156	112,9	114,0	113,5	2326,6	97,8%
157	112,9	113,9	113,4	2327,6	97,9%
158	112,9	113,9	113,4	2327,6	97,9%
159	112,8	113,9	113,4	2328,7	97,9%
160	112,8	113,9	113,4	2328,7	97,9%

Gráfico de compactación Altura v/s N Giros

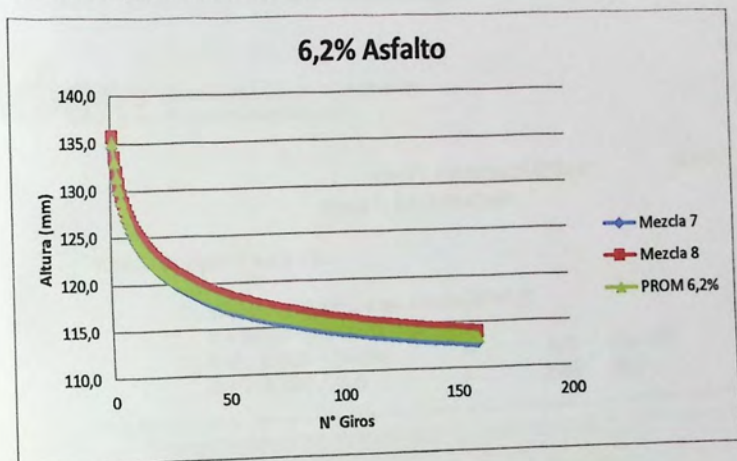
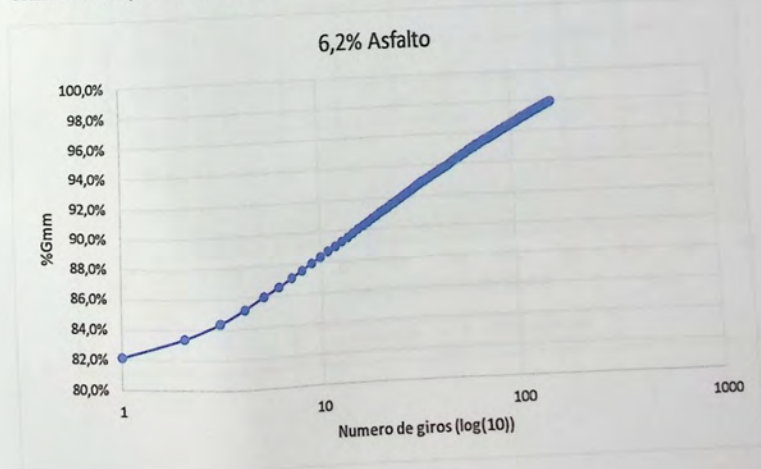


Gráfico %Gmm promedio v/s N Giros



8 Apéndice

Certificado de calibración del instrumento estabilidad y fluencia.

idíem Investigación, Desarrollo e Innovación
de Estructuras y Materiales

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N°
Anexo 1: Curva de ajuste

923074

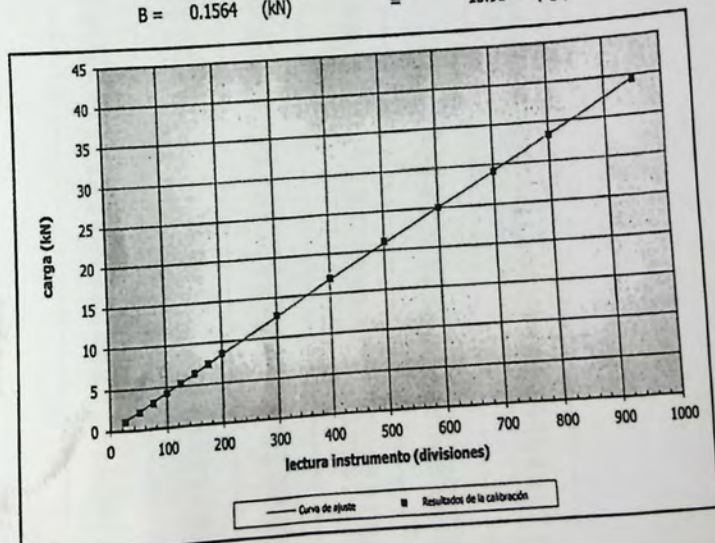
Ecuación de ajuste: $Y = A X + B$

Y = Lectura ajustada, carga o fuerza (kN o kgf)

X = Lectura del Instrumento (div)

$A = 0.0415$ (kN/div) = 4.23 (kgf/div)

$B = 0.1564$ (kN) = 15.95 (kgf)



Factores de corrección por altura para estabilidad Marshall.

VOLUMEN N° 8

Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensayo y Control

MANUAL DE CARRETERAS

8.302.40

Diciembre 2003

ALTURA (mm)	FACTOR	ALTURA (mm)	FACTOR	ALTURA (mm)	FACTOR
46,5	1.758	51,5	1.435	56,5	1.216
46,6	1.750	51,6	1.430	56,6	1.213
46,7	1.742	51,7	1.425	56,7	1.209
46,8	1.734	51,8	1.420	56,8	1.205
46,9	1.726	51,9	1.415	56,9	1.201
47,0	1.718	52,0	1.410	57,0	1.198
47,1	1.710	52,1	1.405	57,1	1.194
47,2	1.702	52,2	1.400	57,2	1.190
47,3	1.694	52,3	1.395	57,3	1.187
47,4	1.686	52,4	1.390	57,4	1.184
47,5	1.678	52,5	1.385	57,5	1.181
47,6	1.670	52,6	1.381	57,6	1.178
47,7	1.663	52,7	1.377	57,7	1.174
47,8	1.656	52,8	1.373	57,8	1.171
47,9	1.649	52,9	1.368	57,9	1.168
48,0	1.643	53,0	1.364	58,0	1.165
48,1	1.636	53,1	1.359	58,1	1.162
48,2	1.629	53,2	1.355	58,2	1.159
48,3	1.622	53,3	1.351	58,3	1.156
48,4	1.615	53,4	1.346	58,4	1.153
48,5	1.608	53,5	1.342	58,5	1.149
48,6	1.601	53,6	1.338	58,6	1.146
48,7	1.594	53,7	1.333	58,7	1.143
48,8	1.588	53,8	1.329	58,8	1.140
48,9	1.581	53,9	1.324	58,9	1.137
49,0	1.574	54,0	1.320	59,0	1.134
49,1	1.567	54,1	1.316	59,1	1.131
49,2	1.560	54,2	1.311	59,2	1.128
49,3	1.554	54,3	1.307	59,3	1.124
49,4	1.549	54,4	1.303	59,4	1.121
49,5	1.543	54,5	1.298	59,5	1.118
49,6	1.538	54,6	1.294	59,6	1.115
49,7	1.532	54,7	1.289	59,7	1.112
49,8	1.526	54,8	1.285	59,8	1.109
49,9	1.521	54,9	1.281	59,9	1.106
50,0	1.515	55,0	1.276	60,0	1.103
50,1	1.509	55,1	1.272	60,1	1.099
50,2	1.504	55,2	1.268	60,2	1.096
50,3	1.498	55,3	1.263	60,3	1.093
50,4	1.493	55,4	1.259	60,4	1.090
50,5	1.487	55,5	1.254	60,5	1.087
50,6	1.481	55,6	1.250	60,6	1.084
50,7	1.476	55,7	1.246	60,7	1.081
50,8	1.470	55,8	1.243	60,8	1.078
50,9	1.465	55,9	1.239	60,9	1.074
51,0	1.460	56,0	1.235	61,0	1.071
51,1	1.455	56,1	1.231	61,1	1.068
51,2	1.450	56,2	1.228	61,2	1.065
51,3	1.445	56,3	1.224	61,3	1.062
51,4	1.440	56,4	1.220	61,4	1.059

ALTURA (mm)	FACTOR	ALTURA (mm)	FACTOR	ALTURA (mm)	FACTOR
61,5	1.056	66,4	0,936	71,3	0,834
61,6	1.053	66,5	0,934	71,4	0,832
61,7	1.049	66,6	0,932	71,5	0,830
61,8	1.046	66,7	0,930	71,6	0,829
61,9	1.043	66,8	0,928	71,7	0,828
62,0	1.040	66,9	0,925	71,8	0,826
62,1	1.037	67,0	0,923	71,9	0,825
62,2	1.035	67,1	0,920	72,0	0,824
62,3	1.032	67,2	0,918	72,1	0,823
62,4	1.029	67,3	0,915	72,2	0,821
62,5	1.027	67,4	0,913	72,3	0,820
62,6	1.024	67,5	0,910	72,4	0,819
62,7	1.021	67,6	0,908	72,5	0,818
62,8	1.019	67,7	0,905	72,6	0,816
62,9	1.016	67,8	0,903	72,7	0,815
63,0	1.013	67,9	0,900	72,8	0,814
63,1	1.011	68,0	0,898	72,9	0,813
63,2	1.008	68,1	0,895	73,0	0,811
63,3	1.005	68,2	0,893	73,1	0,810
63,4	1.003	68,3	0,890	73,2	0,808
63,5	1.000	68,4	0,888	73,3	0,806
63,6	0,998	68,5	0,886	73,4	0,804
63,7	0,995	68,6	0,884	73,5	0,802
63,8	0,993	68,7	0,883	73,6	0,800
63,9	0,990	68,8	0,881	73,7	0,798
64,0	0,988	68,9	0,879	73,8	0,796
64,1	0,985	69,0	0,877	73,9	0,794
64,2	0,983	69,1	0,875	74,0	0,792
64,3	0,980	69,2	0,873	74,1	0,790
64,4	0,978	69,3	0,871	74,2	0,788
64,5	0,975	69,4	0,869	74,3	0,786
64,6	0,973	69,5	0,868	74,4	0,784
64,7	0,970	69,6	0,866	74,5	0,782
64,8	0,968	69,7	0,864	74,6	0,780
64,9	0,965	69,8	0,862	74,7	0,779
65,0	0,963	69,9	0,860	74,8	0,778
65,1	0,960	70,0	0,858	74,9	0,776
65,2	0,958	70,1	0,856	75,0	0,775
65,3	0,956	70,2	0,854	75,1	0,774
65,4	0,954	70,3	0,853	75,2	0,773
65,5	0,953	70,4	0,851	75,3	0,771
65,6	0,951	70,5	0,849	75,4	0,769
65,7	0,949	70,6	0,847	75,5	0,768
65,8	0,947	70,7	0,845	75,6	0,766
65,9	0,945	70,8	0,843	75,7	0,765
66,0	0,943	70,9	0,841	75,8	0,764
66,1	0,941	71,0	0,839	75,9	0,763
66,2	0,939	71,1	0,838	76,0	0,761
66,3	0,938	71,2	0,836	76,1	0,761

Nota: La estabilidad medida de la probeta multiplicada por el factor correspondiente a su altura, es igual a la estabilidad corregida para una probeta de 63,5 mm.

