

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**DISEÑO VOLUMÉTRICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN
CALIENTE DESTINADA A LA CONSERVACIÓN DE UNA
PISTA PARA EL AEROPUERTO ARTURO MERINO
BENITEZ MEDIANTE METODOLOGÍA SUPERPAVE**

Memoria de titulación presentada por:

RODRIGO ALEJANDRO FERNÁNDEZ ZUÑIGA

Como requisito para optar al título de

Constructor Civil

Profesor guía

CARLOS WAHR DANIEL

Valparaíso, Chile

Julio 2018

DISEÑO VOLUMÉTRICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DESTINADA A LA CONSERVACIÓN DE UNA PISTA PARA EL AEROPUERTO ARTURO MERINO BENITEZ MEDIANTE METODOLOGÍA SUPERPAVE

RESUMEN

La mezcla asfáltica compactada tiene tres compuestos principales, el asfalto, el agregado mineral y los vacíos de aire. El asfalto debe aglutinar toda la mezcla, además, un porcentaje es absorbido por los huecos del agregado mineral y otro recubre cada partícula de árido. El agregado mineral entrega una estructura de alta fricción para aguantar las cargas por tráfico y los esfuerzos producidos internamente. Los vacíos de aire están presentes en toda la mezcla luego de ser compactada. La metodología Superpave recomienda que la mezcla deba tener un porcentaje de un 4 por ciento de vacíos de aire para poseer un buen comportamiento estructural en terreno.

Para el año 2017 se busca diseñar una mezcla asfáltica en caliente mediante la metodología Superpave destinada a la conservación de pista del aeropuerto Arturo Merino Benítez. En el pasado, para el año 2016, se diseñó para el mismo aeropuerto otra mezcla, siendo una de las primeras experiencias en Chile con el uso de Superpave. En ésta memoria se presentan los requerimientos que deben cumplir los materiales para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente del año 2017; abarcando la metodología y los criterios del Manual de diseño de mezclas asfálticas MS-2 del Instituto de Asfalto (7ª Edición), además de las normas ASTM y AASHTO referenciadas en este manual.

El objetivo de esta memoria es contrastar el estado de la práctica del uso de Superpave a nivel internacional con los diseños ejecutados en Chile. Para esto se confecciona una mezcla en laboratorio, corroborando el desempeño de la estructura de la mezcla asfáltica en caliente y comparando los resultados con la primera experiencia para el aeropuerto en el año 2016.

Realizado todos los ensayos y cálculos matemáticos es posible diseñar una mezcla asfáltica en caliente que cumpla con los criterios de las especificaciones; además de una buena predicción de su comportamiento en terreno, gracias a los ensayos de desempeño. Aun así no se logran obtener los mismos resultados en dos años consecutivos.

VOLUMETRIC DESIGN OF A HOT ASPHALT MIXTURE DESTINED TO THE CONSERVATION OF A RUNWAY FOR THE ARTURO MERINO BENITEZ AIRPORT BY MEANS OF SUPERPAVE METHODOLOGY

ABSTRACT

The compacted asphalt mix has three main compounds, the asphalt, the mineral aggregate and the air voids. The asphalt must agglutinate the entire mixture, in addition, a percentage is absorbed by the holes of the mineral aggregate and another covers each particle of aggregate. The mineral aggregate provides a high friction structure to withstand the loads caused by traffic and the internally produced efforts. Air voids are present in the entire mixture after being compacted; The Superpave methodology recommends that the mixture should have a percentage of 4 percent of air voids for the mixture to have a good structural behavior in the field. Based on this, a hot asphalt mixture is designed.

For the year 2017, the aim is to design a hot asphalt mix using the Superpave methodology for the conservation of the Arturo Merino Benítez airport runway. In the past, for the year 2016, another mix was designed for the same airport, being one of the first experiences in Chile with the use of Superpave. In this report are presented the requirements that materials for the design of hot mix asphalt of the year 2017 must meet; covering the methodology and criteria of the MS-2 Asphalt Mixes Design Manual of the Asphalt Institute (7th Edition), in addition to the ASTM and AASHTO standards referenced in this manual.

The objective of this report is to contrast the state of the practice of the use of Superpave at international level with the designs executed in Chile. For this, a mixture is made in the laboratory, corroborating the performance of the asphalt hot mix structure and comparing the results with the first experience for the airport in 2016.

Once all the tests and mathematical calculations were carried out, it was possible to design a hot asphalt mixture that met the aforementioned requirements; in addition to a good prediction of their behavior in the field, thanks to the performance tests. Even so, the same results cannot be obtained in two consecutive years.

GLOSARIO

°C	:Grados Celsius
7ma	:Séptima
lb	:Libras
psi	:Pounds-force per square inch (Libra por pulgada cuadrada)
ASTM	:American Society for Testing Materials
BBR	:Bending Beam Rheometer
DSR	:Dynamic Shear Rheometer
DTT	:Direct Tensión Test
EETT	:Especificaciones Técnicas
ESAL's	:Equivalent Simple Axial Load
G*	:Módulo complejo de corte
Gb	:Gravedad específica del aglutinante
Gmb	:Bulk Specific Gravity (Gravedad específica bruta)
Gmm	:Theoretical Maximum Specific Gravity (Gravedad específica teórica máxima)
TSR	:Tensile Strength Ratio
gr	:Gramos
Gsa	:Gravedad específica aparente
Gsb	:Gravedad específica del agregado
Gse	:Gravedad específica efectiva
Kg	:Kilogramos
kPa	:Kilopascales
Lemco	:Laboratorio de ensayo de materiales y control de obra
AASHTO	:American Association of State Highway and Transportation Official
MAC	:Mezcla asfáltica en caliente
Máx.	:Máximo
MCV8	:Manual de Carreteras Volumen 8
Min	:Minutos
Mín.	:Mínimo
mm	:Milímetros
Mpa	:Megapascales
MS2	:Manual Series No.02
N	:Newton
N°	:Número
NMAS	:Nominal Maximum Aggregate (Tamaño máximo nominal del agregado)
NP	:No plástico
PAV	:Pressure Aging Vassel (Envejecimiento en Cámara de Presión)
Pb	:Porcentaje de asfalto
Pba	:Porcentaje de asfalto absorbido
Pbe	:Porcentaje de asfalto efectivo
PC	:Puntos de control
PG	:Performance graded (Grado de performance)
Ps	:Porcentaje de agregado
RAP	:Reclaimed Asphalt Pavement (Pavimento asfáltico)

	recuperado)
RTFO	:Rolling Thin-Film Oven Test
RV	:Rotational Viscometer
s	:Segundos
(S)	:Rigidez de fluencia
SGC	:Superpave Gyrotory Compactor (Compactador giratorio Superpave)
SMA	:Stone Matrix Asphalt
SSD	:Saturated surface-dry mass
Superpave	:Superior Performance Asphalt Pavement
Va	:Vacíos de aire
VAM	:Vacíos en el agregado mineral
VFA	:Vacíos llenos de asfalto
vs	:Versus
δ	:Ángulo de fase

INDICE

Contenido

1. INTRODUCCION.....	11
1.1. Antecedentes Generales:	11
1.2. Objetivo del Estudio.....	12
1.2.1. Objetivos Generales:	12
1.2.2. Objetivos Específicos:	12
1.3. Alcance del estudio.....	13
1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	14
1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	15
2. MÉTODO DE DISEÑO SUPERPAVE PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS	17
2.1. Agregados	17
2.2. Ligante Asfáltico	18
2.3. Mezcla asfáltica	19
2.4. Sensibilidad a la humedad de la mezcla.....	20
2.4.1. Ensayo de tracción indirecta TSR.....	20
2.4.2. Rueda de carga hamburgo	21
2.4.3. Módulo de rigidez	21
3. ESTADO DE LA PRÁCTICA INTERNACIONAL DEL USO DE LA METODOLOGÍA SUPERPAVE.....	22
3.1. Ligante asfáltico.....	23
3.2. Agregados	23
3.3. Diseño de mezcla y control de calidad.....	25
3.4. Planta de producción	27
3.5. Problemas de campo.....	27
4. CONSERVACIÓN RUTINARIA PARA EL AEROPUERTO ARTURO MERINO BENÍTEZ, AÑO 2016.....	29
4.1. Estado del pavimento luego de un año de su construcción.....	31
5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA CONSERVACIÓN DE PISTA DEL AEROPUERTO ARTURO MERINO BENÍTEZ, AÑO 2017.	32
5.1. Agregado.....	32
5.2. Material bituminoso.....	34
5.3. Diseño de la mezcla asfáltica	35

6.	PROCEDIMIENTOS	37
6.1.	Selección de áridos:	37
6.1.1.	Extracción de muestra:	37
6.1.2.	Cuarteo de muestras:	38
6.1.3.	Determinación de la granulometría	40
6.1.4.	Relaciones volumétricas	41
6.1.5.	Propiedades de consenso	43
6.1.6.	Propiedades de Origen:	49
6.2.	Caracterización del asfalto	51
6.2.1.	Grado de Performance (PG)	51
6.3.	Confección de las probetas de prueba	52
6.3.1.	Selección de la granulometría	52
6.3.2.	Estructura del agregado	52
6.3.3.	Estimación del porcentaje de asfalto inicial	57
6.3.4.	Temperaturas de Mezclado y Compactación	61
6.3.5.	Mezclado	61
6.3.6.	Compactación	64
6.4.	Determinación de la gravedad específica bruta (gmb)	64
6.5.	Determinación de la gravedad teórica máxima (Gmm)	67
6.6.	Análisis de los datos del compactador	68
6.7.	Diseño volumétrico de la mezcla asfáltica.	71
6.7.1.	Vacíos de aire inicial (Va)	71
6.7.2.	Vacíos en el agregado mineral (VAM):	71
6.7.3.	Porcentaje de asfalto estimado	72
6.7.4.	Vacíos del agregado mineral estimado	73
6.7.5.	Vacíos rellenos con asfalto estimado	73
6.7.6.	Porcentaje de asfalto efectivo estimado	74
6.7.7.	Proporción de polvo	74
6.7.8.	Porcentaje de Gmm estimado para los números de giros de diseño.	75
6.8.	Determinación de la estructura del agregado de diseño.	76
6.9.	Selección del porcentaje de asfalto de diseño.	77
6.9.1.	Diseño volumétrico para el contenido de asfalto final.	79
6.9.2.	Diseño volumétrico en base a 3,5 % de vacíos de aire	83

6.10.	Susceptibilidad de la mezcla a la humedad (TSR)	85
6.11.	Rueda de carga Hamburgo	87
6.12.	Medición del Módulo de Rigidez mediante el ensayo de Tracción Indirecta. ...	90
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	92
8.	CONCLUSIONES	98
9.	REFERENCIAS	104
10.	ANEXOS	106
10.1.	Corrección gravedad específica bruta de las probetas de prueba	106
10.2.	Gravedades específicas teóricas máximas para las probetas de diseño con 4 porcentajes distintos de ligante.	108
10.3	Corrección de la gravedad específica bruta para las probetas de diseño con 4 porcentajes distintos de ligante.	110

INDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Ubicación y fecha de las reuniones para evaluar el estado de las MAC [5].....	23
Tabla 4-1 Densidades del agregado Aeropuerto 2016	29
Tabla 4-2 Propiedades de consenso para el agregado Aeropuerto 2016.....	30
Tabla 4-3 Propiedades de origen para el agregado Aeropuerto 2016	30
Tabla 4-4 Banda granulométrica para la mezcla de diseño Aeropuerto 2016	30
Tabla 4-5 Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica del 2016 para el Aeropuerto	31
Tabla 5-1 Resumen de los criterios a cumplir para las propiedades del agregado [11].....	33
Tabla 5-2 Criterio para evaluar el PG determinado en terreno [11]	34
Tabla 5-3 Criterio de diseño SGC [11].....	35
Tabla 5-4 Porcentaje mínimo de huecos en el agregado mineral [11].....	36
Tabla 5-5 Granulometría de agregados para pavimentos bituminosos [11].....	36
Tabla 6-1 Familia de tamices en forma descendente	40
Tabla 6-2 Bandas Granulométricas	40
Tabla 6-3 Resumen de las gravedades específicas para los áridos	42
Tabla 6-4 Resultados para la angularidad del agregado fino.....	45
Tabla 6-5 Resumen resultados para las propiedades de consenso	48
Tabla 6-6 Resumen de resultados para las propiedades de origen de los áridos	51
Tabla 6-7 Clasificación PG para el asfalto utilizado	51
Tabla 6-8 Granulometría Mezcla 1.....	53
Tabla 6-9 Granulometría Mezcla 2.....	54
Tabla 6-10 Granulometría Mezcla 3.....	55
Tabla 6-11 Gravedades específicas para cada mezcla de prueba	57
Tabla 6-12 Propiedades de consenso y origen para las mezclas de árido de las granulometrías de prueba... 57	57
Tabla 6-13 Gravedad específica efectiva estimada	58
Tabla 6-14 Resumen cálculo del volumen de asfalto absorbido estimado	59
Tabla 6-15 Resumen cálculo volumen de asfalto efectivo estimado.....	60
Tabla 6-16 Resumen cálculo porcentaje de asfalto inicial	61
Tabla 6-17 Gravedad específica bruta de las mezclas de prueba para una absorción de menos del 2 por ciento	65
Tabla 6-18 Gravedad máxima teórica de las mezclas de prueba	67
Tabla 6-19 Resumen %Gmm promedio de las probetas de prueba	70
Tabla 6-20 Cálculo de los vacíos de aire de las probetas de prueba.....	71
Tabla 6-21 Cálculo del porcentaje de vacíos en el agregado mineral para las probetas de prueba	72
Tabla 6-22 Cálculo del porcentaje de asfalto estimado	72
Tabla 6-23 Cálculo de los vacíos del agregado mineral estimado	73
Tabla 6-24 Cálculo de los vacíos rellenos de asfalto estimado	74
Tabla 6-25 Resultados para el porcentaje de asfalto efectivo estimado	74
Tabla 6-26 Cálculo de la proporción de polvo.....	75
Tabla 6-27 Cálculo del porcentaje de Gmm estimado según el número de giros	76
Tabla 6-28 Resumen comparación mezclas de prueba bajo el diseño volumétrico SUPERPAVE.....	76
Tabla 6-29 Porcentajes de asfalto para las probetas de diseño	77
Tabla 6-30 Gravedades específicas brutas y teóricas máximas para las probetas de diseño.....	77
Tabla 6-31 Promedio de los %Gmm para las probetas de diseño.....	78
Tabla 6-32 Resumen relaciones volumétricas de las probetas de diseño finales	83
Tabla 6-33 Relaciones volumétricas estimadas para las probetas de diseño considerando 3,5% de vacíos de aire.....	83
Tabla 6-34 Porcentaje del Gmm estimado para Nini con un contenido de vacíos igual a 3,5 por ciento	84
Tabla 6-35 Porcentaje del Gmm estimado para N _{máx} con un contenido de vacíos igual a 3,5 por ciento.....	84
Tabla 6-36 Detalles de las probetas para el ensayo TSR.....	85
Tabla 6-37 Detalles del hinchamiento de las Probetas Acondicionadas.....	86
Tabla 6-38 Resultados ensayo TSR	87
Tabla 6-39 Resultados ensayos Rueda de Hamburgo	89

Tabla 6-40 Resultados del Módulo de Rigidez para dos probetas, ensayadas a 15 y 32°C.....	91
Tabla 7-1 Resultados propiedades del agregado y comparación con los criterios exigidos	92
Tabla 10-1 Análisis del porcentaje de gravedad máxima para la mezcla 1	106
Tabla 10-2 Análisis del porcentaje de gravedad máxima para la mezcla 2	107
Tabla 10-3 Análisis del porcentaje de gravedad máxima para la mezcla 3	107
Tabla 10-4 Gravedad específica teórica máxima para la mezcla con 5,25%.....	108
Tabla 10-5 Gravedad específica teórica máxima para la mezcla con 4,75%.....	108
Tabla 10-6 Gravedad específica teórica máxima para la mezcla con 5,75%.....	109
Tabla 10-7 Gravedad específica teórica máxima para la mezcla con 6,25%.....	109
Tabla 10-8 Corrección del %Gmm para la mezcla con 5,25% de asfalto	110
Tabla 10-9 Corrección del %Gmm para la mezcla con 4,75% de asfalto	110
Tabla 10-10 Corrección del %Gmm para la mezcla con 5,75% de asfalto	111
Tabla 10-11 Corrección del %Gmm para la mezcla con 6,25% de asfalto	111

INDICE DE GRAFICOS

Gráfica 6-1 Carta Granulométrica	41
Gráfica 6-2 Distribución granulométrica Mezcla 1.....	53
Gráfica 6-3 Distribución granulométrica mezcla 2.....	54
Gráfica 6-4 Distribución granulométrica mezcla 2.....	55
Gráfica 6-5 Granulometrías para las mezclas de prueba comparadas con la línea de máxima densidad.....	56
Gráfica 6-6 Gráfica del %Gmm con respecto al logaritmo en base 10 del número de giros.....	70
Gráfica 6-7 Curva de densificación de las probetas de diseño	78
Gráfica 6-8 Relación entre los vacíos de aire y el contenido de asfalto.....	79
Gráfica 6-9 Relación entre el VAM y el contenido de asfalto	80
Gráfica 6-10 Relación entre el VFA y el contenido de asfalto	81
Gráfica 6-11 Relación entre la proporción de polvo/asfalto y el contenido de asfalto	83
Gráfica 6-12 Porcentaje de Gmm a los números de giros iniciales según el contenido de asfalto	84
Gráfica 6-13 Porcentaje de Gmm a los números de giros de diseño según el contenido de asfalto	85
Gráfica 7-1 Relación vacíos de aire con respecto al contenido de ligante.....	95
Gráfica 7-2 Relación VAM con respecto al contenido de ligante	95
Gráfica 7-3 Relación VFA con respecto al contenido de ligante	96
Gráfica 7-4 Relación Proporción de polvo con respecto al contenido de ligante	97

ÍNDICE DE IMAGENES

Imagen 3-1 Ángulos de giro del compactador giratorio Superpave [7]	26
Imagen 3-2 Micrómetro con galga para medir diámetros internos [7].....	26
Imagen 6-1 Extracción de agregado grueso	37
Imagen 6-2 Mezclado del árido previo al cuarteo	38
Imagen 6-3 Cuarteo manual del árido.....	39
Imagen 6-4 Remoción de dos cuartas partes del árido.....	39
Imagen 6-5 Distribución del árido por tamices.....	44
Imagen 6-6 Procedimiento de vertido del árido fino	44
Imagen 6-7 Cilindro con muestra para ensayar	47
Imagen 6-8 Vertido de la muestra en las probetas de comparación	47
Imagen 6-9 Pisón dentro de la probeta de ensaye	48
Imagen 6-10 huecos del agregado recubierto permeables al agua no llenos de asfalto absorbido [12].....	58
Imagen 6-11 Cuenco metálico con granulometría de prueba previo a la incorporación del asfalto	63

Imagen 6-12 Mezclado manual con poruña metálica sobre una cama de arena calentada en una cocinilla....	63
Imagen 6-13 Peso en seco de la probeta	65
Imagen 6-14 Peso de la probeta sumergida en agua	66
Imagen 6-15 Secado de la probeta en tela húmeda para conseguir condición SSD	66
Imagen 6-16 Separación de las partículas recubiertas de asfalto para la determinación del Gmm.....	68
Imagen 6-17 Probeta 1 sometida a las ruedas de carga por la máquina de Hamburgo	89
Imagen 6-18 Probeta 2 sometida a las ruedas de carga por la máquina de Hamburgo	90
Imagen 7-1 Comparación entre partículas fracturas versus redondeadas.....	93

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 6-1 Ecuación para calcular la Gravedad específica efectiva estimada [13].....	58
Ecuación 6-2 Ecuación para el volumen de asfalto absorbido estimado [13]	59
Ecuación 6-3 Ecuación para el volumen de asfalto efectivo [13]	60
Ecuación 6-4 Ecuación para el porcentaje de asfalto inicial [13]	60
Ecuación 6-5 Ecuación para el peso seco del agregado en gramos [13]	61
Ecuación 6-6 Ecuación para la determinación de la gravedad específica bruta estimada [13].....	69
Ecuación 6-7 Factor de corrección para la gravedad específica estimada a los N _{máx} [13]	69
Ecuación 3-8 Determinación de la gravedad específica corregida [13].....	69
Ecuación 6-9 Ecuación para el porcentaje de aire inicial [14].....	71
Ecuación 6-10 Ecuación para los vacíos del agregado mineral [14].....	71
Ecuación 6-11 Ecuación para el porcentaje de asfalto estimado [14].....	72
Ecuación 6-12 Ecuación para los vacíos del agregado mineral estimado [14]	73
Ecuación 6-13 Ecuación para el cálculo de los vacíos rellenos de asfalto estimado [14]	73
Ecuación 6-14 Ecuación para el cálculo del porcentaje de asfalto efectivo estimado [14].....	74
Ecuación 3-15 Ecuación para la proporción de polvo [14].....	75
Ecuación 3-16 Ecuación para estimar el porcentaje de gravedad máxima teórica según el número de giros. [14].....	75
Ecuación 6-17 Ecuación para el cálculo de los vacíos rellenos de asfalto de las probetas de diseño [14].....	81
Ecuación 6-18 Ecuación para el cálculo del porcentaje de asfalto efectivo. [14]	82
Ecuación 6-19 Ecuación para el cálculo de la proporción de polvo [14]	82

1. INTRODUCCION

1.1. Antecedentes Generales:

El uso de pavimentos asfálticos es muy común en la construcción de terminales aeroportuarias a nivel nacional y mundial. Este tipo de pavimentos es caracterizado por ser de tipo flexible. Siendo la capa de rodadura (o superior) confeccionada con mezcla asfáltica; debiendo ésta ser capaz de permitir la operación de aeronaves u otros medios vehiculares auxiliares, resistir al desgaste y las agresiones del clima y otros agentes externos.

En el año 2017, debe diseñarse una mezcla asfáltica en caliente para el proyecto de conservación de pista del Aeropuerto Arturo Merino Benitez. Bajo especificación del contrato, la fórmula de mezcla de trabajo debe ser preparada por un laboratorio aprobado por la inspección fiscal.

Este diseño de mezcla asfáltica en caliente debe realizarse de acuerdo al manual MS-2 Mix Design Methods, 7th Edition, Asphalt Institute. Conforme a la metodología SUPERPAVE (SUperior PERformance Asphalt PAVement); implementando la tecnología del Compactador Giratorio Superpave (SGC). En obra, la construcción se ejecutará conforme a los niveles, espesores y perfiles transversales tipo indicados en los planos.

Para efectos de la presente memoria, se llevará a cabo el diseño de la mezcla asfáltica en caliente, indicando en detalle todos los procesos y ensayos necesarios para cumplir con las exigencias entregadas en las especificaciones técnicas complementarias al contrato del proyecto antes mencionado. En forma complementaria, se hace un repaso general del estado de la práctica del uso de la metodología Superpave en USA.

El trabajo efectuado en laboratorio (LEMCO) se realiza por los memoristas Rodrigo Fernández, Sebastián Contreras y Macarena Rivero. Quienes realizan los ensayos y procedimientos en conjunto destinados al proyecto del Aeropuerto. Luego deberán homologar el diseño antes mencionado, incorporando esta vez RAP (Asfalto recuperado reciclado).

1.2. Objetivo del Estudio

A continuación se presentan los objetivos generales y específicos desarrollados en esta memoria.

1.2.1. Objetivos Generales:

- Formar un equipo humano de trabajo, capaz de diseñar, confeccionar y ensayar las probetas de mezcla asfáltica y así evaluar su desempeño; para finalmente entregar un informe con la especificación en detalle de la mezcla asfáltica a fabricar en planta.
- Diseñar una mezcla asfáltica que cumpla con las exigencias de la normativa nacional y las metodologías implementadas, utilizando el manual de diseño MS-2 del Instituto de Asfalto y el Manual de Carreteras de la dirección de vialidad chilena.
- Establecer los parámetros de diseño de la MAC en base a las especificaciones técnicas presentadas en el proyecto de conservación de pista del Aeropuerto Arturo Merino Benítez.

1.2.2. Objetivos Específicos:

- Diseñar una banda granulométrica para los agregados pétreos acorde al diseño.
- Determinar las cantidades de asfalto y agregados pétreos vírgenes en base a las especificaciones técnicas.
- Determinar el cumplimiento de los criterios para con los materiales utilizados, en base a lo especificado en el método Superpave.
- Lograr un diseño de MAC acorde a la normativa nacional; siguiendo una guía estricta con normas de diseño estadounidenses y las especificaciones de la metodología Superpave.
- Medir el desempeño de la mezcla obtenida, mediante los ensayos de susceptibilidad a la humedad (TSR); deformación por cargas repetitivas (Rueda de Hamburgo); y el comportamiento estructural relativo de un pavimento confeccionado con la mezcla (Ensayo de Rigidez).

1.3. Alcance del estudio

- La presente memoria incorpora el diseño de una MAC y los respectivos ensayos para evaluar la calidad de los materiales incorporados. El diseño está basado en la mezcla asfáltica necesaria para el proyecto de conservación de pista del Aeropuerto Arturo Merino Benítez del año 2017.
- El estudio y tema central de esta memoria utiliza el nivel 1 del método Superpave para el diseño de mezclas asfálticas en caliente; que hace referencia a la selección de los materiales para el diseño; a la determinación de las propiedades volumétricas de la mezcla y la posterior evaluación de la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla (TSR), con la finalidad de evaluar la susceptibilidad a la humedad.
- Adicionalmente a los ensayos correspondientes a la metodología Superpave, la Dirección de Aeropuerto solicita que la mezcla diseñada deba ser evaluada a ensayos de desempeño que permitan determinar la susceptibilidad a deformarse cuando están sometidos a cargas por tráfico, mediante la utilización de la Rueda de carga Hamburgo.
- Para evaluar el comportamiento relativo estructural en la carretera de un pavimento asfáltico, se utiliza una probeta compactada de la mezcla asfáltica y se caracteriza según su Módulo de Rigidez.
- Los procedimientos y parámetros para el diseño de la MAC, que satisfacen la metodología Superpave, aluden a las propiedades volumétricas de la mezcla y estas son: vacíos de aire (Va), vacíos del agregado mineral (VAM), vacíos llenos de asfalto (VFA), y otros como la proporción de polvo-asfalto en la mezcla.
- El ligante asfáltico es seleccionado según la graduación PG (Grado de desempeño).
- La granulometría a utilizar en el diseño, tanto para los agregados pétreos vírgenes o el recurso RAP, se basarán en un tamaño máximo nominal del agregado de 19 [mm].
- La compactación de los especímenes se realizará mediante el Compactador Giratorio SUPERPAVE (SGC).

1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

El sistema de trabajo tendrá un enfoque teórico-práctico (experimental), constituido en forma general de 3 etapas:

- a. Marco teórico conceptual.
- b. Desarrollo experimental.
- c. Análisis de resultados.

Para las etapas antes enunciadas, se desarrollarán las siguientes tareas:

a. **Marco teórico conceptual:**

Se presenta una descripción general de la metodología Superpave. Además incluye una breve descripción del estado actual de la práctica de la metodología a nivel internacional y nacional. La experiencia internacional se basa en una serie de reuniones estatales realizadas en los Estados Unidos, donde participaron empresas ligadas al rubro de la producción de ligante asfáltico, productores y diseñadores de mezclas asfálticas en caliente. La experiencia nacional se basa en los proyectos realizados para las pistas del aeropuerto Arturo Merino Benitez en los años 2016 y 2017.

b. **Desarrollo experimental:**

Se sigue una secuencia de trabajo y desarrollo según la metodología SUPERPAVE; donde se incluye, en orden cronológico, la selección de los materiales, para luego verificar la utilidad de estos. Debe revisarse los resultados del ligante asfáltico, para que pueda ser clasificado según el grado de desempeño.

Cumpliendo los materiales con las exigencias, se preparan las probetas compactadas en laboratorio y se le realizan ensayos. En base a lo anterior se selecciona la estructura de diseño. Posteriormente se vuelven a realizar probetas para seleccionar ahora el contenido de ligante asfáltico de diseño. A la mezcla diseñada se le realizan ensayos que verifiquen la susceptibilidad a la humedad, entre estos el ensayo TSR, la caracterización por Rigidez y la deformación de la mezcla compactada al ser sometida a cargas sucesivas, utilizando la Rueda de Hamburgo.

c. **Análisis de resultados:**

Se analizan los resultados obtenidos de acuerdo a la secuencia descrita en el ítem anterior; se compara con los criterios del método de diseño y los resultados obtenidos del diseño para el proyecto de Aeropuerto 2016. Se presentan las conclusiones generales.

1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Esta memoria de titulación está compuesta por una serie de capítulos, que buscan dar a conocer teóricamente la metodología de diseño Superpave; la experiencia nacional e internacional en la práctica, y el desarrollo empírico de un diseño de mezcla.

- **Capítulo 1:** Se presentan los antecedentes generales del presente estudio, y una breve descripción de los temas a desarrollar.
- **Capítulo 2:** Se presentan los conceptos teóricos a utilizar en el diseño de la mezcla asfáltica. Destacando los parámetros involucrados en el método de diseño Superpave.
- **Capítulo 3:** Incluye un repaso general del estado actual de la práctica del uso de la mezcla asfáltica en caliente (MAC) y la implementación de Superpave en Estados Unidos.
- **Capítulo 4:** Presenta en forma breve los detalles de la mezcla asfáltica en caliente destinada a la conservación rutinaria del aeropuerto Arturo Merino Benítez para el año 2016.
- **Capítulo 5:** Presenta el resumen de las especificaciones técnicas para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente destinada a la conservación de pista del aeropuerto Arturo Merino Benítez presentada en los procedimientos de esta memoria.
- **Capítulo 6:** Se presenta en forma cronológica los procedimientos para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente mediante la metodología Superpave.

- **Capítulo 7:** Destinado al análisis de los resultados obtenidos, en comparación a la mezcla de diseño para el año 2016.
- **Conclusiones.**
- **Referencias.**
- **Anexos.**

2. MÉTODO DE DISEÑO SUPERPAVE PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS

En 1987 el SHRP (Strategic Highway Research Program) inició un estudio de cinco años para mejorar el rendimiento de los pavimentos con mezclas asfálticas en caliente. El resultado fue el sistema Superpave (SUPERior Performance Asphalt PAVements). Este sistema se compone de dos elementos interrelacionados: una especificación para el ligante asfáltico (Grado de Performance) y un sistema de diseño de mezcla que especifica los criterios del agregado mineral y las relaciones volumétricas de la mezcla. Se facilita con este sistema, la selección y combinación de asfalto y, de ser necesario, de un aditivo para alcanzar el nivel requerido de comportamiento en el pavimento. El sistema es aplicable tanto para mezclas densas en caliente vírgenes o recicladas.

2.1. Agregados

Durante el desarrollo de Superpave, los expertos en pavimentos estuvieron de acuerdo en que ciertas características de los agregados pétreos eran esenciales para diseñar una MAC de buen rendimiento. Estas características se dividieron en dos categorías: propiedades de consenso y propiedades de origen.

Las **Propiedades de Consenso** son aquellas consideradas por los investigadores críticas para alcanzar una elevada performance de la MAC. Se basan en el nivel de tráfico y en la posición de las partículas de árido dentro de la estructura del pavimento. Estas son:

- Angularidad del agregado Grueso
- Angularidad del agregado Fino
- Partículas planas y alargadas
- Contenido de arcilla o Equivalente de arena

La angularidad del agregado grueso y fino busca lograr una MAC con un alto nivel de fricción interna para así maximizar la resistencia al corte dentro de la estructura del pavimento

Dentro del agregado grueso pueden existir partículas planas y alargadas. Estas deben limitarse por tender a romperse durante la construcción o bajo cargas de tránsito.

El contenido de arcilla tiende a empeorar la unión del ligante asfáltico con el agregado mineral.

Las **Propiedades de origen** se consideran críticas debido a que los valores específicos de estas propiedades no se pudieron alcanzar por consenso; debido a esto los valores necesarios son específicos de la fuente y establecidos por las agencias locales. Existen

- Tenacidad
- Solidez
- Materiales Deletéreos

La tenacidad es la resistencia del agregado grueso a la abrasión y degradación mecánica. La solidez del agregado estima la resistencia de los áridos a cambios climáticos, simulando la acción hielo-deshielo por sucesivos ciclos de mojado y secado del agregado en una solución de sulfato de sodio o magnesio. La última propiedad estima los materiales deletéreos, estos son nocivos para una mezcla como grumos de arcilla, pizarra, madera, mica, carbón o cualquier partícula desmenuzable en el agregado.

2.2. Ligante Asfáltico

En cuanto al ligante asfáltico que se utiliza en la mezcla, éste se caracteriza en función de las condiciones ambientales y las cargas de tráfico. Para lo anterior se realizan pruebas al asfalto cuyos resultados determinan el grado de performance (PG). El PG representa la temperatura máxima y mínima a la cual el asfalto debe mantener sus propiedades durante su vida de servicio; generalmente se especifica durante el diseño del proyecto y no es una variable considerada durante la fase de diseño de la mezcla.

Para el caso de los procedimientos de la presente memoria se utiliza un asfalto con grado PG 76-28. El primer número 76, indica el grado de alta temperatura; que significa que el ligante poseería propiedades físicas adecuadas al menos hasta los 76°C (alta temperatura del clima en el que el ligante estará en servicio). Así mismo, el segundo número 28, indica el grado de baja temperatura; y significa que el ligante poseería propiedades físicas adecuadas hasta al menos los -28°C.

2.3. Mezcla asfáltica

El diseño volumétrico de una mezcla asfáltica en caliente del nivel 1, implica la fabricación de las probetas de ensayo usando el SGC y la selección del contenido de asfalto basado en los vacíos de aire, vacíos del agregado mineral (VAM O VMA), vacíos rellenos de asfalto (VFA), y la relación de contenido de polvo/contenido de asfalto efectivo.

El desempeño de la mezcla inmediatamente después de la construcción es influida por las propiedades de la mezcla resultantes del mezclado en caliente y de la compactación. Por ello fue incorporado un protocolo de envejecimiento a corto plazo al sistema Superpave; la mezcla suelta, antes de ser compactada por el SGC, debe ser envejecida en horno a 135°C, durante 4 horas.

La compactación de la mezcla en el laboratorio se realiza con el compactador giratorio Superpave “SGC-Model 5850-Troxler Laboratories, Inc.”; este es un dispositivo controlado por computadora que ofrece retroalimentación directa a un diseñador, ya que produce sus probetas a través de curvas de compactación (altura v/s número de giros). Las curvas se utilizan como información base para rediseñar mejores mezclas de asfalto.

Al utilizar el SGC se busca replicar la condición de compactación final del pavimento, simulando años de servicio sometido a cargas de tráfico; debido a esto los giros de compactación están en función de los ejes equivalentes (ESALs) que representan la cantidad pronosticada de repeticiones del eje de carga para un período determinado de años de servicio. Se utiliza esta carga equivalente por efectos de cálculo ya que el tránsito está compuesto por vehículos de diferente peso y número de ejes. [1]

La instrumentación moderna de los SGC y la capacidad de medir la altura de la muestra después de cada giro, permite al diseñador estimar un valor de G_{mb} (Gravedad bruta de la mezcla compactada) a cualquier altura de muestra o número de giros. Estos niveles de compactación se dividen en tres por la cantidad de número de giros y en función de la carga de tráfico esperada y el nivel de densificación en el campo. Se designan los números de giro como $N_{inicial}$, $N_{diseño}$, $N_{máximo}$:

- a. $N_{inicial}$: Es una medida de la capacidad de compactación de la mezcla y se basa en la densidad de campo estimada obtenida antes de la compactación. Las especificaciones de densidad oscilan entre 89 y 91,5 por ciento de la Densidad Teórica Máxima Específica (Gmm), dependiendo del nivel de tráfico de diseño.

- b. $N_{\text{diseño}}$:** Es el número de giros especificados para alcanzar la densidad objetivo de la mezcla y se basa en la densidad de campo estimada en el medio de su vida útil. La especificación para la densidad objetivo es 96 por ciento del Gmm.
- c. $N_{\text{máximo}}$:** Es una estimación de la densidad final esperada en el campo al final de su vida útil, después de años de densificación por tráfico. Tiene un límite del 98 por ciento del Gmm para todos los niveles de tráfico.

En cuanto al diseño volumétrico, los parámetros se determinan utilizando las medidas de masa y volumen de una mezcla y sus componentes constituyentes (aglutinante, agregados, aire). Las relaciones entre masa y volumen permiten determinar las gravedades específicas de los materiales (G); este es un número adimensional definido como la relación entre la densidad de un material y la densidad del agua.

El principio del uso de la gravedad específica es esencial en el sentido de que las mediciones reales en el laboratorio son en masa, aunque los criterios de mezclado son una función del volumen. El uso de este principio permite calcular fácilmente datos masivos o volumétricos basados en lo obtenido del laboratorio. [2]

2.4. Sensibilidad a la humedad de la mezcla

Parte de la metodología Superpave exige evaluar la mezcla asfáltica a las condiciones de humedad. Se busca así asemejar las condiciones a las cuales es sometida la mezcla en terreno con el propósito de reducir el acceso de agua a la interfaz de los agregados en la mezcla asfáltica y proporcionar un drenaje adecuado del agua.

2.4.1. Ensayo de tracción indirecta TSR

La prueba de tracción indirecta (TSR) es comúnmente utilizado para medir la resistencia a la tracción indirecta de dos subconjuntos de probetas, uno parcialmente saturado en agua y otro mantenido a temperatura ambiente, ambos subconjuntos con un porcentaje de 7 por ciento de vacíos de aire. Es importante que los dos subconjuntos sean equivalentes en propiedades y que el contenido de vacíos de aire de cada conjunto no difiera en ± 0.2 por ciento. [3]

Los resultados se obtienen luego de cargar las probetas axialmente, y el cálculo se realiza dividiendo la resistencia a la tracción indirecta promedio de las tres muestras acondicionadas (húmedas) por la resistencia a la tracción indirecta promedio de las tres

muestras no acondicionadas (secas). De acuerdo con la investigación original, un valor de TSR de 80 por ciento o mayor generalmente se considera aceptable, lo que indica una mezcla de asfalto que no es susceptible a daños por humedad. Por el contrario, un valor de TSR de 60 por ciento o menos generalmente se considera inaceptable.

Las pruebas de desempeño para las mezclas MAC se realizan para estimar su rendimiento antes de su uso en una instalación de transporte y a la vez evaluar nuevos materiales y herramientas de diseño para mejorar el rendimiento de los pavimentos fabricados.

2.4.2. Rueda de carga Hamburgo

A medida que aumenta la temperatura del pavimento, la mezcla de asfalto se vuelve más blanda y es más susceptible a la carga por tráfico. La deformación permanente ocurre cuando la mezcla de asfalto se deforma bajo carga y luego no se recupera a su posición original. Con el tiempo, la deformación permanente puede conducir a la formación de surcos. Las pruebas de rueda de carga son un método común utilizado para evaluar la susceptibilidad de la mezcla a este tipo de deformaciones. En una prueba de rueda cargada Hamburgo, una rueda de acero descansa directamente sobre las probetas de mezcla asfáltica, cargándose hacia adelante y atrás. Con cada ciclo de carga, una cierta cantidad de deformación es creada en la probeta de la mezcla de asfalto. Las pruebas pueden realizarse en muestras secas o muestras sumergidas en agua. Después de un número específico de ciclos de carga, se determina la deformación permanente (formación de surcos) en la probeta y se compara con los criterios establecidos para determinar la susceptibilidad de rodadura de la mezcla de asfalto.

2.4.3. Módulo de rigidez

El módulo de rigidez es el valor absoluto del Módulo complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal. E^* es el módulo visco-elástico del material. En la teoría visco elástica, el valor absoluto del módulo complejo $|E^*|$, por definición es el módulo dinámico. Los valores del módulo dinámico pueden emplearse tanto para el diseño de la mezcla asfáltica para pavimento, como para el diseño del espesor de la capa de pavimento asfáltico. [4]

Para obtener este parámetro, el ensayo busca reproducir el estado de tensiones críticas en la zona de tracción del pavimento asfáltico, presentes en la fibra inferior de la carpeta. En el laboratorio se aplica un pulso de carga axial de compresión diametral, de corta

duración, a una probeta cilíndrica, de diámetros 100 [mm] o 150 [mm] con un espesor entre 50[mm] a 70 [mm], extraída de un pavimento o fabricado en laboratorio. Esta carga se aplica en dos generatrices opuestas y debe tener la forma de onda de medio seno o parecida.

Realizado el ensayo se obtiene el módulo de rigidez que corresponde a la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación durante el tiempo de carga, para la probeta sujeta a los pulsos de carga, con una deformación controlada. Este módulo es calculado automáticamente por el software del equipo.

3. ESTADO DE LA PRÁCTICA INTERNACIONAL CON EL USO DE LA METODOLOGÍA SUPERPAVE

Uno de los principales objetivos de la implementación y desarrollo de la metodología Superpave era lograr la uniformidad en las especificaciones y pruebas utilizadas por los distintos estados en USA. La uniformidad facilitaría el intercambio de información y experiencia entre estados.

En 2004 y 2005, la Asociación Nacional de Pavimento de Asfalto (NAPA) y la Administración Federal de Carreteras (FHWA) organizaron una serie de reuniones en USA para evaluar el estado actual de la práctica del uso de la mezcla asfáltica en caliente (MAC) y la implementación de Superpave. Las discusiones en los talleres incluyeron lo que estaba funcionando bien con Superpave y qué aspectos percibieron los usuarios que necesitaban refinamiento.

Las ubicaciones de las reuniones se muestran en la Tabla 2-1. Con el fin de obtener la verdadera experiencia en la práctica de la metodología Superpave, los invitados representaron a cada agencia estatal de carreteras y a la industria de pavimentación asfáltica en cada estado.

Tabla 3-1 Ubicación y fecha de las reuniones para evaluar el estado de las MAC [5]

Grupo	Ubicación	Fecha
Noreste	Portsmouth, New Hampshire	Octubre 21-22, 2004
Sudeste	Baton Rouge, Louisiana	Octubre 18, 2004
Norte Central	Lafayette, Indiana	Enero 26, 2005
Montaña Rocosa	Denver, Colorado	Abril, 2005

Las reuniones abarcaron los siguientes temas:

- Ligantes
- Agregados
- Diseño de mezcla y control de calidad
- Producción en planta
- Problemas de campo

3.1. Ligante asfáltico

Los ligantes con clasificación PG se desarrollaron especialmente para la metodología Superpave siendo hoy en día la norma en todo USA. Durante los talleres de NAPA-FHWA, se comentaron pocos problemas con los ligantes por parte de los productores de mezclas en caliente.

También hubo poca consistencia en cómo se determinan las temperaturas de mezclado y compactación. Algunos estados aceptan las recomendaciones de los fabricantes, mientras que otros usan ciertos rangos de temperatura para varios grados. Para la mezcla de laboratorio y las temperaturas de compactación, algunos estados usan una temperatura fija para todo o para grados específicos, mientras que otros usan los valores de los fabricantes. En general la comunicación entre el proveedor de la mezcla y el diseñador puede ayudar a evitar cualquier tipo de problemas.

3.2. Agregados

Las mezclas más gruesas se mencionaron con frecuencia como más sensibles a los cambios en las propiedades del agregado. Por lo anterior, se realizaron cambios a la metodología que consisten en alteraciones a los requisitos y límites de gradación, y en los tamices de control o bandas maestras de gradación. En general, han implementado cambios en la gradación para alentar el uso de mezclas más finas para controlar la permeabilidad, mejorar la lisura y durabilidad.

Otros cambios en las especificaciones para el agregado incluyen la alteración de criterios para las propiedades tales como la angularidad del agregado fino (AAF), el valor del equivalente de arena y el contenido de partículas planas y alargadas. Estos cambios generalmente se hicieron para permitir un mayor uso de materiales locales que podrían no cumplir con los criterios originales.

La prueba para determinar la angularidad del agregado fino (AAF) a menudo se cuestionó. Muchos observaron que la prueba AAF realmente discrimina contra algunos agregados cúbicos deseables, a favor de partículas desmenuzables que aumentan el volumen. Debido a problemas con la prueba o al incumplimiento de los límites de la AAF para el agregado disponible localmente, muchos estados han cambiado o eliminado el requisito. Bajar el criterio para la AAF en mezclas de alto volumen de tránsito es bastante común. Por otro lado, algunos estados recomiendan la especificación de la AAF para carreteras de volumen medio. [5]

Muchos estados han limitado el contenido de arena natural. En el oeste, Arizona y Nuevo México comentaron que han visto aumentos en la arena natural utilizada con el propósito de controlar los vacíos excesivos en el agregado mineral (VAM).

Un estudio realizado por Texas Transportation Institute determinó que la forma del agregado y la textura de la superficie desempeñan un papel muy importante en la deformación permanente de la MAC; y que las mezclas preparadas con grava de río parcialmente triturada fueron más sensibles a este deterioro en comparación a las preparadas con piedra caliza o granito de cantera. En este mismo estudio se determinó que la zona restringida, mencionada en la metodología Superpave, debe eliminarse de las especificaciones. [6]

Los estados también han implementado programas o cambios en los ya existentes para ayudar a controlar la variabilidad en las propiedades del agregado; por ejemplo, la variación en la gravedad específica o la absorción de una fuente de agregado, desde el borde al borde o incluso dentro de un solo borde del acopio, se citaba con frecuencia como un problema. Las mezclas gruesas Superpave parecen ser más sensibles a estos cambios. También, la dependencia de las relaciones volumétricas al cambiar la gravedad específica y la absorción, aumenta la preocupación en el diseño ya que estos cambios afectan los vacíos de aire, el VAM y finalmente el rendimiento. Algunos contratistas realizan pruebas de gravedad específica más frecuentes para adaptarse a los cambios.

3.3. Diseño de mezcla y el control de calidad

Muchos estados expresaron su preocupación de que las mezclas eran bajas en contenido de ligante. Durante la práctica, algunos contenidos indicados habían disminuido en 0.1 a 0.2 por ciento, mientras que otros estados indicaron que el contenido disminuyó mucho más de 0.7 por ciento desde que se implementó el sistema de diseño Superpave.

Otra preocupación fue la durabilidad a largo plazo de las mezclas en el noroeste y sureste de USA. Para esto algunos estados disminuyeron el contenido de vacíos de aire de diseño, en promedio a 3,5 por ciento, en comparación al 4 por ciento exigido por la metodología Superpave. Otros cambiaron los niveles de giro o usaron un nivel mayor de giro dado para un nivel de tráfico especificado por AASHTO. En otros casos, se especificaron contenidos mínimos de aglutinante y/o espesores de películas del agregado para garantizar que haya un contenido de ligante adecuado en la mezcla.

Lograr el VAM adecuado durante el diseño y producción de la mezcla sigue siendo un problema. Algunos ajustaron las gradaciones, como se mencionó anteriormente, o cambiaron directamente los requisitos de VAM para obtener más ligante en las mezclas. Una forma común de aumentar el VAM es eliminar un porcentaje de los finos. Un contratista señaló que si el VAM cambia durante la producción, verificaba la gravedad específica del agregado.

Un estado cambió su protocolo de compactación giratoria para utilizar el concepto de punto de bloqueo, y así ayudar a evitar mezclas secas y permeables. El punto de bloqueo es el punto en el cual la altura de una probeta en el SGC se mantiene constante por tres giros consecutivos, lo que indica que es el momento en el cual la estructura de la granulometría de la mezcla se traba y alcanza la máxima compactación en el compactador giratorio. La compactación después de este momento conlleva a la degradación del agregado [7]. Este concepto ayuda a redefinir y estimar el número de giros de diseño.

Con respecto al giro del compactador, existen problemas al comparar los resultados de las pruebas de los contratistas y las agencias. El uso del ángulo interno para calibrar los giroscópicos ha ayudado a muchos estados a resolver algunas de estas diferencias. Otros estados aún usan sólo el ángulo externo y no reportan problemas. El ángulo externo se define como el ángulo entre la pared del molde y la vertical. El ángulo interno se define

como el ángulo entre las paredes del molde y los platos base superior e inferior. Estos ángulos se ilustran en la figura 3-1.

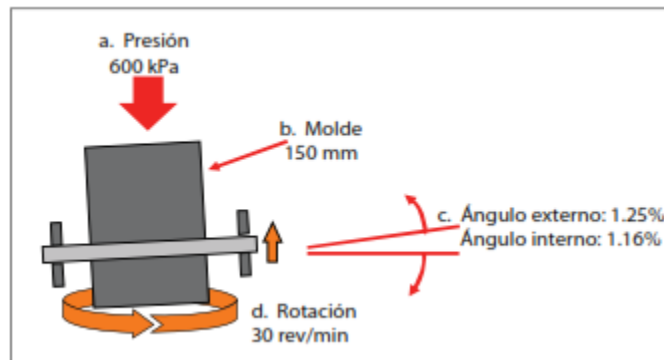


Imagen 3-1 Ángulos de giro del compactador giratorio Superpave [8]

Además de la calibración, es muy importante incluir dentro del mantenimiento, el cuidado y la revisión de los moldes de compactación, se debe asegurar la limpieza de los mismos para evitar su deterioro, y sobre todo para asegurar la uniformidad del diámetro de los especímenes. Para ello, cada año se realiza una verificación del diámetro interno de los moldes con un micrómetro con una galga de diámetros internos, como se ve en la imagen 3-2, para comprobar que el proceso de desgaste a la hora de la compactación y extracción de las pastillas no sea significativo afectando la tolerancia permitida para el diámetro. [8]



Imagen 3-2 Micrómetro con galga para medir diámetros internos [8]

3.4. Planta de producción

Los temas que preocupan en la producción de mezclas asfálticas en plantas tienen relación con la necesidad de conseguir una mejor consistencia. La consistencia es fundamental para controlar el contenido de polvo, reducir la segregación, fraccionar o procesar los agregados, etc. Los criterios para la consistencia generalmente se acomodan a las propias prácticas de los contratistas y proveedores, en lugar de los cambios a las especificaciones de un proyecto.

El uso de contenedores de alimentación en frío para los agregados se citó con frecuencia como una forma de obtener un mejor control de las gradaciones agregadas. También se recomienda medir el polvo en la mezcla y calibrar este sistema de medición. El control de la humedad en la mezcla se citó como clave para evitar problemas con la zona sensible (estado de la mezcla donde su temperatura varía entre 65-150 ° C).

Secar adecuadamente los agregados afecta los costos en combustible y la productividad para las plantas. Mantener los agregados secos antes de introducirlos en la planta ayuda a mitigar el impacto económico. Varios productores de mezclas calientes dijeron que habían pavimentado sus áreas de acopio para ayudar a controlar la humedad en los agregados; algunos incluso han cubierto sus acopios.

La dotación de personal y la capacitación adecuada es esencial para guiar la producción; la importancia de las personas de control de calidad ha sido primordial. Varios contratistas señalaron que permiten que este personal controle el proyecto, ajustando la mezcla o la producción final. Además de tener conocimiento, las personas de control de calidad deben tener la autoridad para realizar los cambios necesarios.

3.5. Problemas de campo

Un problema que se ha observado durante años, en un pequeño porcentaje de proyectos es la sensibilidad de algunas mezclas durante la compactación. Las mezclas sensibles no son estables debajo del rodillo y tienden a moverse lateralmente cuando se compactan; este movimiento lateral a veces produce grietas finas.

Según dos encuestas de NAPA, aproximadamente el 40 por ciento de las mezclas Superpave de grado grueso experimentan algo de sensibilidad. También se ha observado que esto no se produce inmediatamente cuando comienza la compactación, sino que, en cambio, comienza poco después cuando se reduce la temperatura de la mezcla. La

mayoría de la información indica que la sensibilidad comienza una vez que la temperatura de la superficie cae a aproximadamente 150° C y continúa hasta que la temperatura desciende a aproximadamente 82-88° C y en algunos trabajos a 65° C. Este rango de temperatura (65-150° C) en el que la mezcla es blanda se conoce como zona sensible [9]

En los talleres se confirmaron que los contratistas han aprendido a manejar estos problemas y que no existe una solución que funcione en todos los casos. Deben ser flexibles y ajustarse sobre la marcha para hacer frente a los cambios en la mezcla. Cambiar rodillos y patrones de rodillos ha ayudado en muchos casos. Agregar un rodillo al tren de compactación también puede ayudar a lograr una densidad adecuada antes de que se enfríe la mezcla. Los rodillos neumáticos, rodillos de alta frecuencia y rodillos oscilatorios fueron citados como útiles en algunos casos.

También se sugirió evitar la zona sensible al monitorear la temperatura de la mezcla. Los cambios en los espesores de elevación en muchos estados también han ayudado a reducir los problemas de compactación. Especialmente con mezclas gruesas, se necesitan mayores elevaciones para asegurar la compactación. Muchos estados han aumentado el grosor de la elevación a cuatro veces el tamaño máximo nominal del agregado (NMAS). Otros están usando tres veces el nominal.

La densidad en las juntas es otra área de preocupación para los estados y contratistas. El proceso de compactación se debe enfocar en lograr la mayor densidad en y alrededor de la junta longitudinal; reducir la segregación en la junta puede ayudar, al igual que el sellador de juntas, el rodado adecuado entre otros [10].

3.6. Rendimiento de la Mezcla Asfáltica en Caliente

El tema importante cubierto en los talleres regionales NAPA-FHWA fue el nivel de desempeño de la MAC en la actualidad. Algunas de las preocupaciones sobre el rendimiento incluyen la permeabilidad, las densidades en las juntas y la durabilidad. Los problemas de permeabilidad se encontraron en algunas zonas. Los cambios en el espesor de la elevación, el uso de mezclas más finas y más cuidado en la compactación han resuelto estos problemas.

Las densidades en las juntas son un problema en algunos estados; existen varias alternativas como solución: cambios en los rodillos y los patrones de los rodillos, rastrillado adecuado del material de la junta, uso de juntas con muescas, selladores, entre

otros. Especificar un requisito de densidad en la junta ayuda a enfocar la atención en el problema.

La durabilidad es una preocupación en el noreste y sudeste de USA. Para ello se han realizado cambios en las prácticas de diseño de la mezcla, como el uso de gradaciones más finas y que requieran contenidos mínimos de aglutinante. En otras partes del país, las mezclas están funcionando sin problemas de durabilidad hasta la fecha. De hecho, la mayoría de los participantes en estas reuniones indicaron que la MAC está funcionando mejor que nunca. Las deformaciones permanentes han sido eliminadas en gran medida. Las especificaciones PG han logrado reducciones significativas en el agrietamiento térmico.

4. CONSERVACIÓN RUTINARIA PARA EL AEROPUERTO ARTURO MERINO BENÍTEZ, AÑO 2016.

En el 2016 la Dirección de Aeropuertos realizó el primer pavimento asfáltico en Chile diseñado con la metodología Superpave. Algunos detalles del diseño serán mencionados a continuación:

El agregado mineral utilizado procede del acopio de la planta San Guillermo y corresponde a un agregado chancado con las siguientes densidades, indicadas en la tabla 4-1.

Tabla 4-1 Densidades del agregado Aeropuerto 2016

Muestra N°	3/4"	1/2"	Polvo roca
Densidad Real Seca [Kg/m³]	2.688	2.684	2.655
Densidad Real Neta [Kg/m³]	2.774	2.780	2.779
Absorción de Agua [%]	1,2	1,3	1,7

En cuanto al cumplimiento de los criterios Superpave para las propiedades del agregado, el resumen se presenta en las tablas 4-2 y 4-3.

Tabla 4-2 Propiedades de consenso para el agregado Aeropuerto 2016

Muestra N°	3/4"	1/2"	Polvo Roca	Requerimiento Superpave
Angularidad del Agregado Grueso (1) [%]	98	99	-	80% mín.
Angularidad del Agregado Grueso (2) [%]	91	95	-	75% mín.
Angularidad del Agregado Fino [%]	-	-	50,1	40% mín.
Partículas Lajeadas [%]	0,93	2,51	0,00	10% máx.
Equivalente de Arena [%]	-	-	66	45% mín.

Tabla 4-3 Propiedades de origen para el agregado Aeropuerto 2016

Muestra N°	3/4"	1/2"	Polvo Roca	Requerimiento Superpave
Tenacidad [%]	12	15	16	25% máx.
Durabilidad [%]				
<i>Desintegración por Sulfato de Sodio</i>	1,00	1,00	0,70	10% máx.
<i>Desintegración por Sulfato de Magnesio</i>	1,20	1,20	0,90	13% máx.
Materiales Deletéreos [%]	0,03	0,13	0,00	5% máx.

La mezcla asfáltica diseñada incorpora una estructura granulometría, detallada en la tabla 4-4, compuesta por un 16% de grava gruesa de tamaño 3/4", 29% de grava gruesa de 1/2" y un 55% de polvo de roca. Con un contenido óptimo de ligante asfáltico de un 5,4% para un contenido de vacíos de aire de 3,5%.

Tabla 4-4 Banda granulométrica para la mezcla de diseño Aeropuerto 2016

[mm]	Tamiz		Mezcla	Puntos de Control	Banda Especificada
	mm a 0,45	ASTM			
25	4,26	1"	100	100	100
19	3,76	3/4"	100	90 - 100	100
12,5	3,12	1/2"	89	-90	79 - 99
9,5	2,75	3/8"	75	-	68 - 88
4,75	2,02	N°4	53	-	48 - 68
2,36	1,47	N°8	36	23 - 49	33 - 53
1,18	1,08	N°16	23	-	20 - 40
0,63	0,81	N°30	16	-	14 - 30
0,315	0,59	N°50	12	-	9 - 21
0,15	0,43	N°100	8	-	6 - 16
0,075	0,31	N°200	4,95	2 - 8	3 - 6

El ligante utilizado se clasifica con un grado PG 82-22. Posee un grado mayor de resistencia a la alta temperatura en comparación a un PG 76-22, exigido en las especificaciones para este proyecto.

Para seleccionar el contenido óptimo de ligante, se realizan pruebas volumétricas para 4 porcentajes de ligante asfáltico y luego son graficados. Posteriormente se detalla la

mezcla final de diseño para el proyecto. Los resultados para la mezcla final aparecen en la tabla 4-5.

Tabla 4-5 Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica del 2016 para el Aeropuerto

Relaciones Volumétricas	Mezcla de Diseño	Requerimiento Superpave	Requerimiento Especificación
Gravedad Específica Bruta [Gmb] [Kg/m ³]	2,416	-	-
Gravedad Específica Teórica Máxima [Gmm] [Kg/m ³]	2,503	-	-
Vacíos de Aire [%]	3,5	4,00%	3,50%
V.A.M [%]	14,4	13%	15%
V.F.A [%]	75,7	65 - 78%	-
Proporción de Polvo	1,16	0,6 - 1,2	-
Contenido Óptimo de Ligante Asfáltico [%]	5,4	-	5,0 % - 7,5%
Números de Giros Inicial	7	7	-
Números de Giros de Diseño	75	75	75
Números de Giros Máximos	115	115	-
%Gmm @ Números de Giro Inicial	87,7	≤ 90,5 %	-
%Gmm @ Números de Giro de Diseño	96,6	96%	
%Gmm @ Números de Giro Máximo	97,2	< 98%	
Óptimo de Ligante Asfáltico [%]	5,4 ± 0,3	-	
Densidad de Diseño [Kg/m ³]	2,416	-	-

Los resultados de la susceptibilidad a la humedad; incluyendo el ensayo TSR, determinación del módulo de rigidez y la prueba de rueda de Hamburgo, serán analizados en comparación al diseño 2017 en el capítulo de Análisis de Resultados.

4.1. Estado del pavimento luego de un año de su construcción

Uno de los principales objetivos del uso de la metodología Superpave en el diseño del aeropuerto era evitar el ahuellamiento, producido por los altos niveles de tránsito, tráfico pesado y/o lento y las altas temperaturas de servicio. Después de un año de seguimiento, los resultados indican que el ahuellamiento disminuyó en un 71 por ciento en comparación con un pavimento diseñado por la metodología Marshall. Para determinar este resultado se midieron las deformaciones verticales en 4 puntos aleatorios en los tramos intervenidos con Superpave. La superficie fue evaluada con una regla de 5 metros, extendida de forma transversal y longitudinal, en las fajas oriente y poniente en forma independiente, teniendo así un total de 4 lecturas (2 longitudinales y 2 transversales). [11]

5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA CONSERVACIÓN DE PISTA DEL AEROPUERTO ARTURO MERINO BENÍTEZ, AÑO 2017.

A continuación se presenta un resumen de las especificaciones de este proyecto desde el documento "ETG N°1-A: Pavimentos Bituminosos Tipo Mezcla en Planta Diseñado".

5.1. Agregado

El agregado corresponde a un árido chancado; en donde la fracción de material combinado retenido en el tamiz N° 4 (4,75 [mm]) será considerado agregado grueso. La fracción que pasa el tamiz N°4 y retenido por el tamiz del N° 200 (0,075[mm]) es agregado fino, y la fracción que pasa el tamiz del N° 200 es filler mineral.

Agregado grueso: Debe estar constituido por partículas resistentes, libre de películas adherentes que dificulten el recubrimiento con el material bituminoso y estarán libres de materia orgánica u otras sustancias dañinas. El porcentaje de desgaste no será mayor a 25 % cuando esté ensayado de acuerdo con la norma ASTM C 131.

La desintegración por sulfato de sodio no excederá el 10 %, y la desintegración por sulfato de magnesio no excederá el 13 %, después de 5 ciclos, cuando esté ensayada de acuerdo con la norma ASTM C 88.

El agregado tendrá por lo menos el 90% en peso con dos caras fracturadas y el 100% en peso con una cara fracturada. El área de cada cara será igual, al menos, al 75 % del área más pequeña de la sección transversal del fragmento. Cuando dos caras fracturadas estén contiguas, el ángulo entre los planos de fractura será al menos de 30 grados para que se puedan contabilizar como dos caras fracturadas. Las caras fracturadas serán obtenidas mediante chancado mecánico.

El agregado no contendrá más del 8% en peso de fragmentos lajeados o alargados, ni mezcla de ambos, cuando esté ensayado de acuerdo con la norma ASTM D4791 con un valor 5:1.

Agregado fino: consistirá en partículas limpias, duraderas, con forma angulosa producida por el chancado del árido, o grava que cumpla los requisitos de desgaste e integridad especificados para el agregado grueso. Las partículas de agregado estarán libres de capas de arcilla, limo o de otro material no deseable y no contendrán ningún terrón de arcilla. El agregado fino, incluyendo cualquier material mezclado con el mismo, tendrá un índice de plasticidad no mayor a 6 % y un límite líquido de no más de 25 % cuando esté ensayado de acuerdo con ASTM D 4318.

La arena natural se puede utilizar para obtener la granulometría deseada para la mezcla de agregados o para mejorar la trabajabilidad de la mezcla. El agregado fino no contendrá arena natural en una cantidad superior al 15 % en peso de los agregados totales, de acuerdo a la norma ASTM C88.

El agregado tendrá valores de equivalente de arena de 35 o superior cuando esté ensayado de acuerdo con la norma ASTM D 2419. El árido fino será árido no plástico (NP).

Muestreo: La norma ASTM D75 será utilizada para el agregado grueso y fino, y la norma ASTM C 183 para el mineral de relleno o filler.

Las especificaciones para el agregado deben cumplir con el resumen expuesto en la tabla 5-1. Los informes certificados de estos ensayos deben ser remitidos a la Inspección Fiscal.

Tabla 5-1 Resumen de los criterios a cumplir para las propiedades del agregado [12]

N°	Ensayo	Valor	Norma
1	Desgaste L.A	Máx. 25%	ASTM C131
2	Desintegración por sulfato de sodio	Máx. 10%	ASTM C88
3	Desintegración por sulfato de magnesio	Máx. 13%	ASTM C88
4	Partículas chancadas	Mín. 90%	ASTM D4791
5	Más de dos caras fracturadas	Mín. 90%	ASTM D4791
6	Partículas lajeadas	Máx. 8%	ASTM D4791
7	Equivalente de arena	Mín. 45%	ASTM D2419
8	Límite Líquido	Máx. 25%	ASTM D4318
9	Límite Plástico	IP= Máx 6	ASTM D 4318

5.2. Material bituminoso

El ligante asfáltico debe ser clasificado de acuerdo a la norma ASTM D6373, según el grado de desempeño PG. Se clasificará con grado del tipo PG 76-22. Además, deberá cumplir con los parámetros indicados en la Tabla N° 7.2 de ensayos de ligante asfáltico.

La selección del grado PG para un proyecto particular se determina considerando un valor PG inicial que depende de la ubicación donde se colocará la mezcla asfáltica. Una vez determinado el valor inicial de PG, se analiza el valor PG del proyecto de acuerdo a la Tabla 5-2.

La mezcla asfáltica en caliente a colocar en el recarpeteo asfáltico programado para la pista 17R-35L, será del tipo Modificada con Polímeros y tendrá un espesor aproximado de 16 [cm].

En caso de requerir aditivos de adherencia, este debe ser estable al calor, no cambiar la viscosidad del cemento asfáltico más allá de las especificaciones y no contendrá ingredientes dañinos.

Tabla 5-2 Criterio para evaluar el PG determinado en terreno [12]

Peso Bruto aeronave	Alta Temperatura del grado PG
	Para todo tipo de pavimentos
≤ 5.670 kg	
< 45.360 kg	1 Grado
≥ 45.360 kg	2 Grado
El grado de baja temperatura se mantiene constante	

No se recomienda el grado de baja temperatura menor a -22 (ejemplo: PG XX-16 o PG XX-10). La experiencia ha mostrado que bajos grados PG (-16 y -10) incrementa el desarrollo de grietas en bloque.

5.3. Diseño de la mezcla asfáltica

El Diseño de la mezcla debe realizarse de acuerdo a MS-2 Mix Design Manual, 7ma Edition, Asphalt Institute. Las probetas deben ser confeccionadas con 4 diferentes contenidos de ligante y compactadas con la Prensa Compactadora Giratoria de acuerdo a la norma ASTM D6925.

Se debe definir la proporción de los materiales pétreos, filler y cemento asfáltico, para que se cumpla con las exigencias que se indican a continuación, las que están determinadas por el método de diseño Superpave de mezcla asfáltica de pavimentos diseñados para aeronaves con peso bruto de 60.000 [lb] o más, o presión de neumáticos mayor a 100 [psi] (Ver Tabla 5-3).

La granulometría de los agregados pétreos para la capa de superficie bituminosa, deberán ajustarse a la banda granulométrica de tamaño máximo $\frac{3}{4}$ " (Tabla 5-5), indicada en las ETE N° 1ª para Pavimentos Bituminosos Tipo Mezcla en Planta Diseñados por Superpave.

Los requisitos de diseño de la mezcla asfáltica deben estar basados en la información indicada en la Tabla 5-3: Criterio de diseño SGC, Tabla 5-4: Porcentaje mínimo de huecos en el agregado mineral y en la Tabla 5-5: Granulometrías de agregados para pavimentos bituminosos.

Tabla 5-3 Criterio de diseño SGC [12]

Característica	Pavimentos diseñados para aeronaves con peso bruto de 60.000 libras o más o presión de neumáticos mayor a 100 psi	Pavimentos diseñados para aeronaves con peso bruto inferior a 60.000 libras o más o presión de neumáticos mayor a 100 psi
N° de Giros	75	50
Porcentaje de huecos de la mezcla	3,5	3,5
Porcentaje de huecos en el agregado mineral (mínimo)	Ver Tabla 2.1.3.2	Ver Tabla 2.1.3.2

Tabla 5-4 Porcentaje mínimo de huecos en el agregado mineral [12]

Granulometría	Mínimo de huecos en el agregado mineral
Graduación 3	16%
Graduación 2	15%
Graduación 1	14%

Tabla 5-5 Granulometría de agregados para pavimentos bituminosos [12]

Tamiz		Porcentaje en peso que pasa por tamiz	
Tamaño		Graduación 3/4" Max-19mm	
Pulgada	mm aprox.	Inferior	Superior
1"	25	100	100
3/4"	19	90	100
1/2"	13		90
3/8"	10		
N°4	5		
N°8	2	23	49
N°30	1		
N°50	0.63		
N°100	0.315		
N°200	0.15	2	8

6. PROCEDIMIENTOS

Este capítulo detalla cronológicamente los pasos realizados para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente; partiendo por la selección de los materiales para luego comprobar su utilidad para la mezcla. Se describe el proceso de mezclado y compactación. Luego el ensayo de las probetas confeccionadas y la verificación de los criterios pertenecientes a la metodología.

6.1. Selección de áridos:

Lo primordial es abastecerse de agregados pétreos que cumplan con los requisitos Superpave y lograr una estructura de agregado con suficiente fricción interna que otorgue mejores cualidades a la mezcla asfáltica.

6.1.1. Extracción de muestra:

El muestreo se realiza desde los acopios de la planta San Guillermo de Santiago, el 8/09/2017, para áridos con tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ y polvo roca; transportados por LEMCO, identificados con la nomenclatura AS-1679-1, AS-1679-2, AS-1679-3 respectivamente.

Debe diseñarse un plan de muestreo en base a la norma ASTM D75. En caso de tomar muestras de la pila de agregado grueso, es necesario tomar de 3 zonas, de la parte superior de la pila, del punto medio y del fondo de la pila (Ver imagen 6-1). Para el agregado fino, es necesario tomar muestras que se encuentran bajo el material segregado, por lo que se introducen tubos de 30 [mm] de diámetro por 2 metros de longitud. Los tubos se introducen en lugares aleatorios, y deben ser de mínimo 5 zonas distintas de la pila.



Imagen 6-1 Extracción de agregado grueso

6.1.2. Cuarteo de muestras:

Para los distintos tamaños de agregado se requiere que las muestras sean representativas, es decir, que la muestra utilizada para los ensayos se componga de forma similar a la granulometría de origen. El material obtenido de los acopios debe ser siempre mayor que la cantidad utilizada para el ensaye. Por lo anterior, el material debe ser reducido a la cantidad que indique el ensaye a practicar; el método será cuartearlo manualmente. El material en un comienzo debe estar húmedo. Se debe mezclar bien y formar un cono como se aprecia en la imagen 6-2. Con esto se busca uniformidad en el material; luego se aplasta el cono, para obtener un montón plano y ancho, cuyo espesor y distribución de los tamaños del agregado sea razonablemente uniforme. Se divide el montón en 4 partes iguales, con un cuarteador metálico manual como se ve en la imagen 6-3. Se remueven dos cuartas partes opuestas, como en la imagen 6-4, y se repite el proceso con el resto hasta obtener un tamaño deseado.



Imagen 6-2 Mezclado del árido previo al cuarteo



Imagen 6-3 Cuarteo manual del árido



Imagen 6-4 Remoción de dos cuartas partes del árido

6.1.3. Determinación de la granulometría

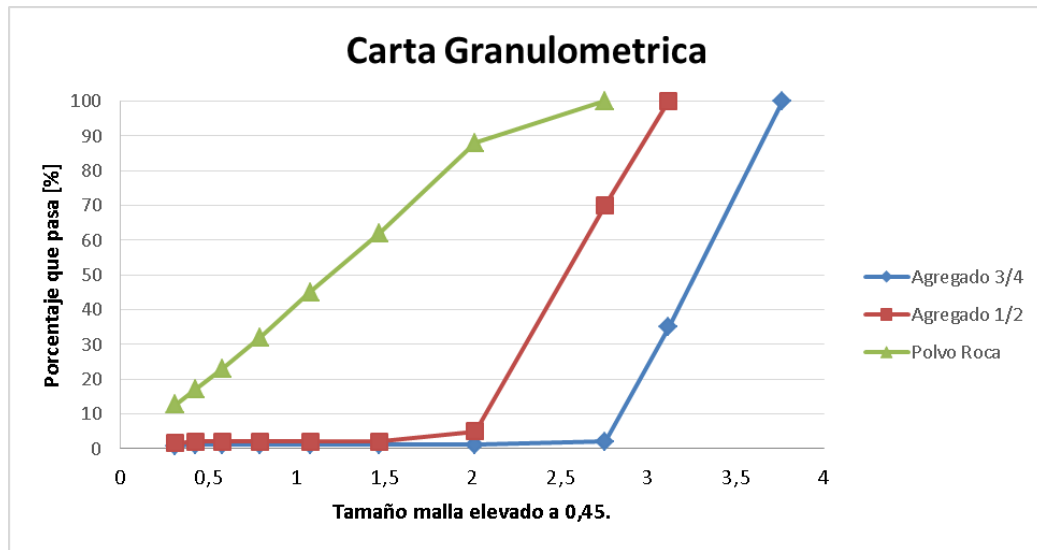
Para el siguiente ensayo deben utilizarse la familia de tamices cilíndricos con tejido de alambre que se muestran en la Tabla 6-1. Se seleccionan las masas a ensayar de los 3 tipos de agregados, debiendo ser mayores al mínimo especificado. Luego deben secarse hasta masa constante a una temperatura de 110°C. Una vez seco el material se procede a tamizar el agregado. Realizado el tamizado se registran los pesos retenidos para cada tamiz, se calculan los porcentajes que pasan por tamiz y se obtiene las granulometrías de la tabla 6-2. Con los valores de los tamices elevados a la potencia de 0,45 se construye la carta granulométrica (Gráfica 6-1).

Tabla 6-1 Familia de tamices en forma descendente

Tamaños nominales de abertura	
mm	ASTM
19	3/4"
12,5	1/2"
10	3/8"
5	N°4
2,5	N°8
1,25	N°16
0,63	N°30
0,315	N°50
0,16	N°100
0,08	N°200

Tabla 6-2 Bandas Granulométricas

Muestra N°			AS-1679-1	AS-1679-2	AS-1679-3
Tamices			Porcentaje que pasa [%]		
ASTM	mm.	mm a 0,45			
3/4"	19	3,76	100	100	100
1/2"	12,5	3,12	35	100	100
3/8"	10	2,75	2	70	100
N°4	5	2,02	1	5	88
N°8	2,5	1,47	1	2	62
N°16	1,25	1,08	1	2	45
N°30	0,63	0,81	1	2	32
N°50	0,315	0,59	1	2	24
N°100	0,16	0,43	1	2	17
N°200	0,08	0,31	0,8	1,6	12,6



Gráfica 6-1 Carta Granulométrica

6.1.4. Relaciones volumétricas

Se determinan a continuación las gravedades específicas de los agregados grueso y fino.

6.1.4.1. Gravedades Específicas para el agregado grueso

Seleccionar una muestra representativa de los áridos. Debe secarse la muestra por 24 horas a 110°C. Luego se enfría a temperatura ambiente y cuando el árido se pueda manipular, debe sumergirse en agua por 24 horas. Pasado el tiempo se retira la muestra del agua y se envuelve en un paño absorbente, para secar hasta conseguir la condición saturada superficialmente seco (SSD). Se registra esta masa.

Se vuelve a sumergir la muestra y se registra la masa bajo el agua. Luego se retira la muestra y se seca hasta masa constante a 110°C. Se retira y se deja enfriar hasta temperatura ambiente. Se registra esta masa. Con las masas registradas se calculan las gravedades específicas indicadas en la tabla 6-3.

6.1.4.2. Gravedades Específicas para el agregado fino

Seleccionando una muestra representativa del árido, se reduce por cuarteo para obtener aproximadamente 1 [Kg] de muestra. Debe secarse a 110° C hasta obtener una masa constante. Logrado lo anterior, se deja enfriar a temperatura ambiente y luego cubrir con agua y dejar reposar durante 24 horas.

Pasado el tiempo, se extiende la muestra con cuidado para no perder ningún fino y se seca hasta la condición SSD. Debe llenarse un picnómetro parcialmente con agua y agregar 500 gramos del árido SSD dentro de este. Rellenar luego con agua hasta el 90 % de su capacidad. Agitar el picnómetro manualmente hasta remover las burbujas de aire.

Se termina de llenar el picnómetro hasta su marca de calibración y se registra la masa del picnómetro, del agregado y del agua. Se retira el agregado del picnómetro y se deja secar hasta masa constante a 110 °C. Luego dejar enfriar a temperatura ambiente y registrar la masa una vez enfriado. Registrar la masa del picnómetro lleno con agua hasta su marca de calibración. Los resultados para las densidades se muestran en la Tabla 6-3

Tabla 6-3 Resumen de las gravedades específicas para los áridos

Muestra N°	AS-1679-1	AS-1679-2	AS-1679-3
Gravedad específica seca (Gsb) [Kg/m ³]	2692	2680	2597
Gravedad específica SSD (Gs,ssd) [Kg/m ³]	2729	2720	2700
Gravedad específica aparente/neta (Gsa) [Kg/m ³]	2795	2792	2770
Absorción del agregado [%]	1,37	1,51	1,70

6.1.5. Propiedades de consenso

A continuación se describe el procedimiento para determinar las propiedades de consenso para el agregado mineral:

6.1.5.1. Angularidad del agregado Grueso

Se escoge una masa mínima según la norma ASTM D5821 Of.13 para los agregados con NMAS $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ ". Luego debe secarse durante 24 horas a 110°C; para así obtener una separación limpia entre el árido grueso y fino en el tamizado.

Se extiende la muestra sobre un mesón para poder inspeccionar cuidadosamente cada partícula del agregado. Debe seleccionarse las partículas fracturadas según el criterio de la norma ASTM D5821 Of.13. Subdividiéndolas en partículas con 1 cara fracturada o partículas con 2 o más caras fracturadas. Los resultados serán expresados como un porcentaje en masa de la cantidad total; y se ven en la Tabla 6-4.

6.1.5.2. Angularidad del agregado Fino

Se selecciona el método B según el criterio de la norma ASTM C1252-06. Se preparan los instrumentos, calibrando y registrando las masas de los aparatos a utilizar. La muestra requiere ser lavada, pasándola por el tamiz N°200; luego secada durante 24 horas a 110° C. La muestra debe ser fraccionada por los tamices N°8, N°16, N°30 y N°50 y mantenidas secas en diferentes contenedores como se aprecia en la imagen 6-5.

Se coloca el embudo mencionado en la norma sobre una paila metálica; bajo este se centra una probeta cilíndrica. Se debe tapar la abertura del embudo con un dedo y verter la muestra en el embudo como muestra la imagen 6-6. Luego nivelar la muestra en el embudo con una espátula y retirar el dedo para que caiga en la probeta cilíndrica.

Una vez que se vacíe el embudo, se elimina el exceso de agregado acumulado en el cilindro mediante una pasada rápida de la espátula. Evitando en todo momento mover los aparatos para que no se compacte la muestra. Determine la masa de la probeta cilíndrica y del contenido. Se calculan los vacíos sin compactar para cada muestra y se muestran en la Tabla 6-4.



Imagen 6-5 Distribución del árido por tamices



Imagen 6-6 Procedimiento de vertido del árido fino

Tabla 6-4 Resultados para la angularidad del agregado fino

Calibración del cilindro		Datos	Unidad			
cilindro+grasa+placa de vidrio		295,7	g			
temperatura de agua		22	c°			
cilindro+grasa+placa de vidrio+agua		394,6	g			
cilindro seco, sin grasa, sin vidrio		258,1	g			
Cálculo de volumen de cilindro		Datos	Unidad			
Volumen del cilindro		99,1	ml			
Masa Neta del agua		98,9	g			
Densidad del agua		997,86	kg/m3			
Valores Parciales						
Fracciones	N°8-N°16		N°30-N°50		N°30-N°50	
Masa del cilindro+ agregado	388,2	388,7	384	383,8	380,3	380,4
Masa neta del agregado	130,1	130,6	125,9	125,7	122,2	122,3
Promedio	130,35		125,8		122,25	
Gravedad especifica aparente del agregado	2,57					
Porcentaje de huecos no compactados	48,82%		50,61%		52%	
Porcentaje de huecos promedio	50,48%					

6.1.5.3. Partículas Lajeadas

Se selecciona una masa mínima para la muestra para cada tipo de árido, que luego es tamizada entre los tamaños N°4 y 3/4".Luego son secadas las muestras a 110 °C hasta obtener una masa constante. Se etiquetan y registran la masa de cada muestra.

Para cada fracción debe separarse visualmente las partículas chancadas y rodadas. De la porción chancada se determina mediante un pie de metro las partículas que caracterizan a una laja y debe registrarse la masa de lajas y no lajas, con respecto a la masa total de chancadas. De igual forma se realiza para la porción de rodadas. El cálculo de los porcentajes se ven expresados en la tabla 6-4.

6.1.5.4. Equivalente de Arena

Extraer una muestra representativa del árido polvo de roca. La muestra debe pasarse por el tamiz N°4, logrando que pase como mínimo 1500 [g]. Disgregar el material arcilloso que quede retenido en el tamiz N°4, frotando el material retenido en el tamiz para que el fino adherido se incorpore a la muestra a ensayar. Desechar el material retenido en el tamiz N°4. Secar hasta masa constante la muestra de ensayo a 110° C.

Debe llenarse un recipiente cilíndrico con la muestra seca y a temperatura ambiente, logrando que el material se asiente como se aprecia en la imagen 6-7; luego se enrasa y vierte en una probeta con la solución base de cloruro de calcio como muestra la imagen 6-8. Se golpea el fondo de la probeta con la palma de la mano para eliminar las burbujas de aire y se deja reposar la probeta por 10 minutos. Terminado este tiempo, debe colocarse el tapón en la probeta y sacudirla manualmente y en forma horizontal para soltar el material del fondo.

Colocar la probeta sobre la mesa de trabajo, destapar y lavar sus paredes interiores mediante el irrigador, introduciéndolo hasta el fondo de la probeta y aplicando torsión para remover todo el material. Retirar el irrigador, y ajustar el nivel de la solución para alcanzar los 380 [mm]. Dejar sedimentar por un período de 20 [min] para después leer y registrar el nivel superior de la arcilla aproximando al milímetro (línea de sedimentación).

Introducir el pisón en la probeta, haciéndolo descender suavemente hasta que quede apoyado en la arena como muestra la imagen 6-9. Registrar el nivel superior de la arena aproximado al milímetro. Los resultados se muestran en la tabla 6-5.



Imagen 6-7 Cilindro con muestra para ensayar



Imagen 6-8 Vertido de la muestra en las probetas de comparación



Imagen 6-9 Pisón dentro de la probeta de ensaye

Tabla 6-5 Resumen resultados para las propiedades de consenso

Muestra N°	AS-1679-1	AS-1679-2	AS-1679-3
Angularidad del Agregado Grueso (1 o más caras) [%]	100	100	100
Angularidad del Agregado Grueso (2 o más caras) [%]	94	99	100
Angularidad del Agregado Fino [%]			51
Partículas Lajeadas [%]	0	0,7	0
Equivalente de Arena [%]			57

6.1.6. Propiedades de Origen:

Las siguientes propiedades caracterizan al agregado en base a su lugar de origen o por su formación geológica.

6.1.6.1. Determinación de la Resistencia al Desgaste por Abrasión e Impacto

Este ensayo se realiza en la “Máquina de los Ángeles”, que consiste en un cilindro hueco de acero, con un espesor de pared de al menos 12 [mm], cerrado en ambos extremos. La superficie interior del cilindro debe estar libre de protuberancias que interrumpen la trayectoria de la muestra y las esferas de acero.

Se obtiene una muestra representativa del tipo de árido a ensayar. Lavar la muestra y secar al horno a 110°C hasta masa constante. Separar en fracciones de tamaños individual, para con esto seleccionar el grado de ensayo que mejor representa la muestra, además del número de esferas de acero.

Colocar la muestra de ensayo dentro de la máquina junto a las esferas y ensayar de acuerdo a un número de revoluciones específico. Completado el número de revoluciones, se extrae la muestra con cuidado de no provocar pérdidas y de contaminar los áridos. Se separa de las esferas. Debe realizarse un primer tamizado, pasando la muestra por el tamiz N°8. Luego, lo que pasa, debe tamizarse por segunda vez en la malla N°12. El material retenido en el primer y segundo tamizado debe juntarse, lavarse y secarse a 110°C hasta masa constante. Se registra la masa anterior como la masa final. Se procede a realizar los cálculos que se muestran en la Tabla 6-6.

6.1.6.2. Solidez del agregado

Se obtiene una muestra representativa del árido de tamaño máximo $\frac{3}{4}$ y $\frac{1}{2}$ ". La muestra debe ser tamizada por el tamiz N°4. El árido a ensayar no será de tamaño menor a este tamiz. Con el árido seco, se tamiza para conseguir las fracciones requeridas y especificadas. Registrar las masas iniciales de cada una de ellas.

Cada fracción se coloca en un canastillo y se sumergen los canastillos con la muestra en las soluciones de sulfato de sodio y sulfato de magnesio, a una temperatura de 22°C durante 16-18 horas. Las soluciones deben cubrir al menos en $\frac{1}{2}$ " a los áridos. Deben cubrirse los recipientes para evitar la evaporación o cualquier contaminación.

Después de la inmersión, retirar los canastillos y dejar escurrir las muestras por 15 minutos. Luego secar hasta masa constante a 110°C. Conseguida la masa constante, se deja secar a temperatura ambiente y volver a repetir el proceso de inmersión 5 veces. Terminado los ciclos y enfriada la muestra, deben lavarse los áridos con cloruro de bario hasta eliminar los sulfatos.

Secar las muestras a 110° C y conseguir la masa constante. Luego debe tamizarse y calcularse el porcentaje de pérdida de masa. Los resultados se muestran en la Tabla 6-6.

6.1.6.3. Materiales Deletéreos

Seleccionar una muestra representativa de los áridos y secar a 110°C. Para el caso del agregado fino la muestra debe contener partículas superiores al tamiz N°16 con una masa no inferior a 25 [gr]. Para mezclas de agregados gruesos y finos debe separarse la muestra en el tamiz N°4. Fraccionar la muestra del agregado grueso y escoger la masa mínima.

Extender la muestra en el fondo de un recipiente, cubrir con agua destilada y dejar sumergida por 24 [horas]. Pasado este período, apretar las partículas individualmente entre el pulgar y el índice para romper la partícula en pedazos más pequeños. Después de que se rompan todos los grumos de arcilla, debe separarse la muestra mediante un tamizado en húmedo. Retirar las partículas retenidas y secar hasta masa constante a 110°C; dejar enfriar y determinar la masa. Los resultados se muestran en la Tabla 6-6.

Tabla 6-6 Resumen de resultados para las propiedades de origen de los áridos

Muestra N°	AS-1679-1	AS-1679-2	AS-1679-3	Requerimiento EETT
Tenacidad [%]	11,1	13,4	15,5	25 máx.
Durabilidad [%]				
<i>Desintegración por Sulfato de Sodio</i>	3,5	3,4		10 máx.
<i>Desintegración por Sulfato de Magnesio</i>	4,4	4,5		13 máx.
Materiales Deletéreos [%]	0	0	0,8	2 máx.

6.2. Caracterización del asfalto

El asfalto utilizado en laboratorio proviene de la empresa OIL MALAL, desde la planta ubicada en San Antonio, quinta región de Chile. Es de tipo CA modificado, envasados en tarros metálicos con capacidad entre los 800 y 500 [gr].

Debe determinarse en base a la norma ASTM D70 o AASHTO T 228. Equivale a la relación de la masa de una unidad de volumen de aglutinante a la masa del mismo volumen de agua. Varía generalmente entre 1.00 a 1.05; el asfalto utilizado para la presente memoria posee una gravedad específica igual a 1.021.

6.2.1. Grado de Performance (PG)

Las especificaciones técnicas requieren de un ligante con grado PG 76-22. El asfalto en el laboratorio, luego de ser ensayado para su clasificación, arrojó un PG 76-28. El resultado de los ensayos se puede ver en la Tabla 6-7.

Al comparar estos grados, el asfalto en el laboratorio posee un grado más de resistencia a la baja temperatura.

Tabla 6-7 Clasificación PG para el asfalto utilizado

Ligante Original	Resultados	Requerimiento Superpave
Punto de Inflamación °C	318	230 mínimo
Viscosidad Rotacional 135°C Pa*s	1,782	3 máximo
Reómetro Dinámico de Corte G*/senδ@76 °C kPa	1,41	1,00 mínimo
Ligante Envejecido- HPDR		
Cambio de masa %	-0,23	±1,00 máximo
Reómetro Dinámico de Corte G*/senδ@76 °C kPa	2,49	2,20 mínimo
Ligante Envejecido- PAV		
Reómetro Dinámico de Corte G*/senδ@19 °C kPa	3510	5000 máximo
Reómetro de Flexión Stiffness @ -18 °C Mpa	127,5	300 máximo
Reómetro de Flexión Valor m@-18°C	0,32	0,30 mínimo
Grado de Desempeño	PG 76-28	PG 76-22

6.3. Confección de las probetas de prueba

Se preparan 6 probetas de prueba, con 3 granulometrías distintas, compactadas al $N_{m\acute{a}x}$ de giros del compactador. Adicionalmente, deben prepararse mínimo dos muestras por granulometrías para el cálculo de la gravedad teórica máxima (Gmm). En base a los resultados deberá seleccionarse una de estas granulometrías para la confección de las 4 probetas de diseño; éstas últimas diferenciadas por los porcentajes de asfalto. Tanto para las probetas de prueba como para las de diseño, estas se crean en base a los 115 giros de compactación. Con estos procedimientos se busca conseguir un 4 por ciento de vacíos en una probeta de mezcla asfáltica compacta y 115 [mm] de altura a los 75 giros de diseño.

6.3.1. Selección de la granulometría

Para comenzar cualquier procedimiento de dosificación es necesario secar completamente los agregados. Las muestras traídas de la planta llegan al laboratorio saturadas de humedad. El agregado fino tiende a absorber un mayor porcentaje de humedad que el agregado grueso. La humedad absorbida aumenta el peso del agregado, dando proporciones de material inexacto.

Con el material seco, éste se fracciona para mantener acopios de reserva por tamaño de tamiz; utilizando toda la familia de tamices de la Tabla 6-1, más una reserva adicional del material que pasa la malla N°200. Este procedimiento se realiza a los tres tipos de áridos utilizados. Se clasifican y almacenan en bolsas plásticas que eviten la intromisión de humedad, correctamente etiquetados con nombre representativo y su peso en gramos. Deben guardarse en un lugar libre de humedad y disponible para la confección de cualquier mezcla.

6.3.2. Estructura del agregado

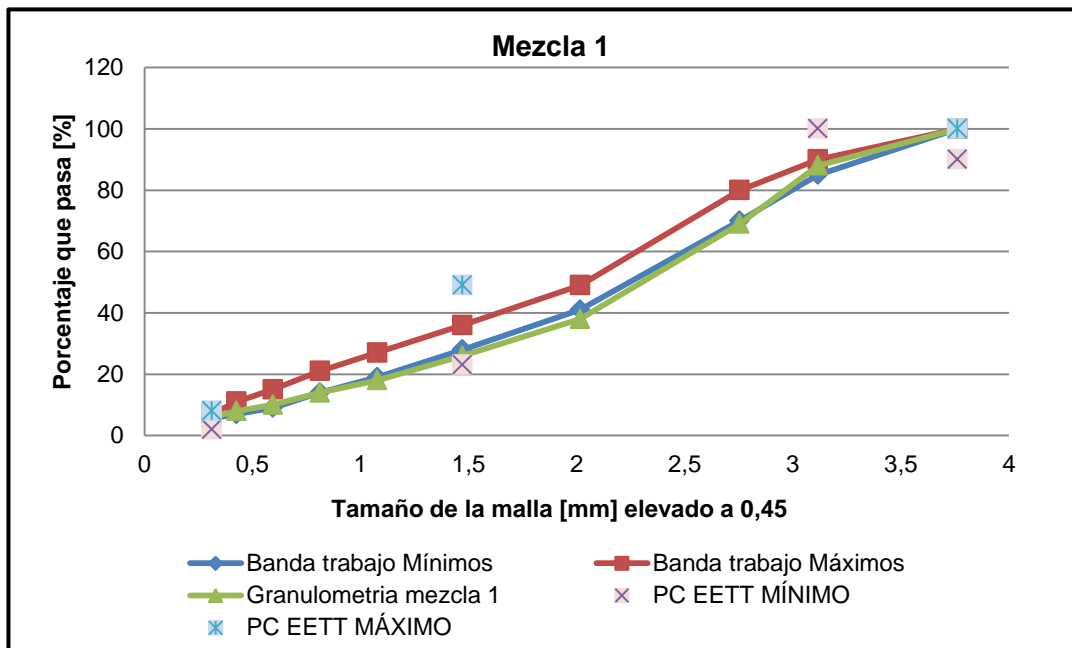
Para encontrar la estructura del agregado de diseño adecuada, deben combinarse granulometrías individuales de cada una de las pilas de acopio de materiales hasta encontrar una dosificación tal que satisfaga los requerimientos de la especificación Superpave para los tamices de control, luego debe especificarse una banda de trabajo.

Normalmente se utilizan tres mezclas de prueba, las cuales son evaluadas para determinar sus propiedades volumétricas en función de un determinado contenido de asfalto. Debe seleccionarse una de las mezclas de prueba, aquella que se acerca más a los requerimientos de diseño. Esta pasa a ser la estructura de diseño.

En base a las especificaciones técnicas se escogen 3 granulometrías que cumplan con la banda de trabajo. Las granulometrías difieren en el porcentaje de cada tipo de árido a incorporar en la mezcla. A continuación, se muestran las 3 mezclas a utilizar en las tablas 6-8, 6-9 y 6-10 para la confección de las probetas. Además las respectivas bandas granulométricas en las gráficas 6-2, 6-3 y 6-4.

Tabla 6-8 Granulometría Mezcla 1

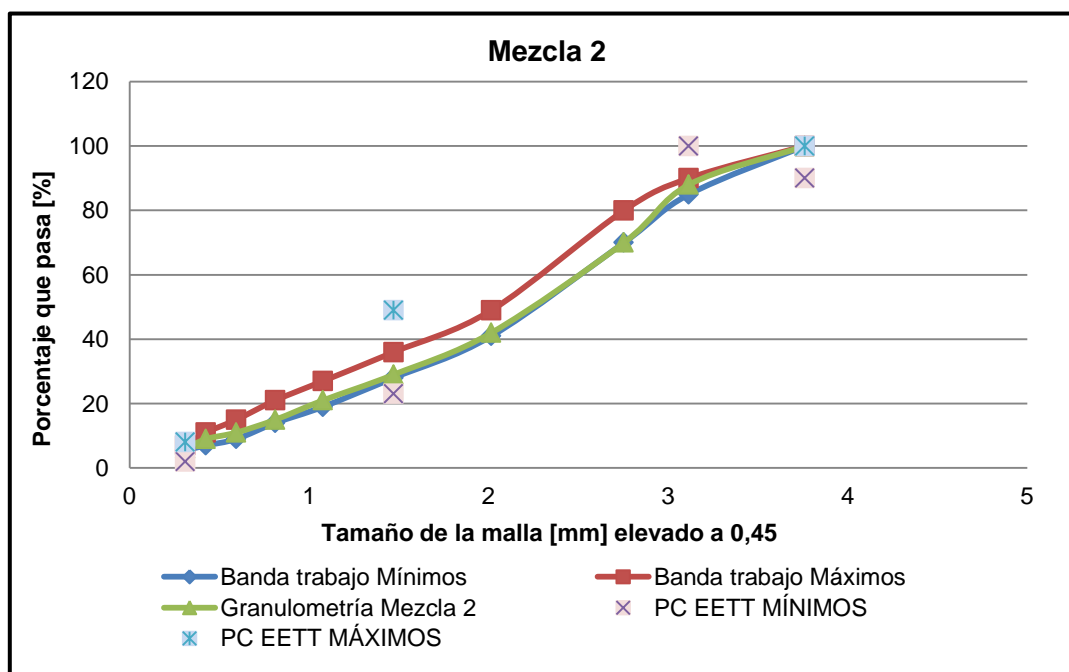
Mezcla de prueba 1- NMAS 19 [mm]							
% usado	20	39	41	Mezcla de prueba	Banda Granulometrica	Puntos Control EETT	Tamiz [mm]
Tamiz ["]	Gravilla 3/4	Gravilla 1/2	Polvo Roca				
3/4"	100	100	100	100	100	90-100	19
1/2"	38	100	100	88	85-90	100	12,5
3/8"	2	70	100	69	70-80		9,5
N°4	1	5	88	38	41-49		4,75
N°8	1	2	62	26	28-36	23-49	2,36
N°16			45	18	19-27		1,18
N°30	1	2	32	14	14-21		0,63
N°50	1	2	23	10	9-15		0,315
N°100	1	2	17	8	7-11		0,15
N°200	0,8	1,6	12,6	6	5,5-7,0	2-8	0,075



Gráfica 6-2 Distribución granulométrica Mezcla 1

Tabla 6-9 Granulometría Mezcla 2

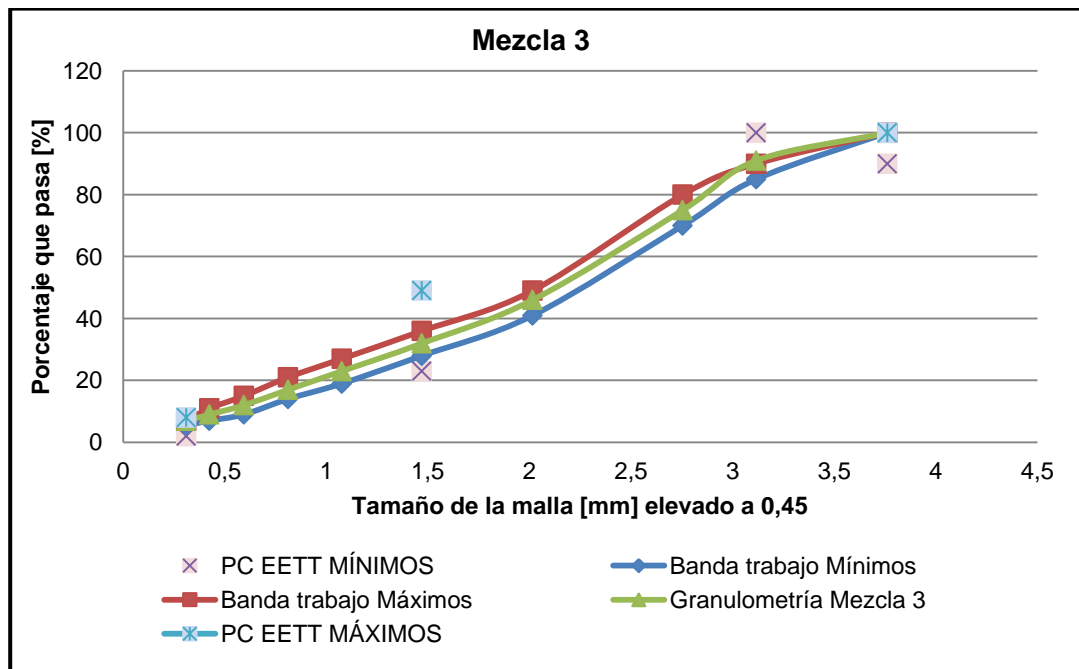
Mezcla de prueba 2- NMAS 19 [mm]							
% usado	20	35	45	Mezcla de prueba	Banda granulometrica	puntos control EETT	Tamiz [mm]
Tamiz ["]	Gravilla 3/4	Gravilla 1/2	Polvo Roca				
3/4"	100	100	100	100	100	90-100	19
1/2"	38	100	100	88	85-90	100	12,5
3/8"	2	70	100	70	70-80		9,5
N°4	1	5	88	42	41-49		4,75
N°8	1	2	62	29	28-36	23-49	2,36
N°16	1	2	45	21	19-27		1,18
N°30	1	2	32	15	14-21		0,63
N°50	1	2	23	11	9-15		0,315
N°100	1	2	17	9	7-11		0,15
N°200	0,8	1,6	12,6	6	5,5-7,0	2-8	0,075



Gráfica 6-3 Distribución granulométrica mezcla 2

Tabla 6-10 Granulometría Mezcla 3

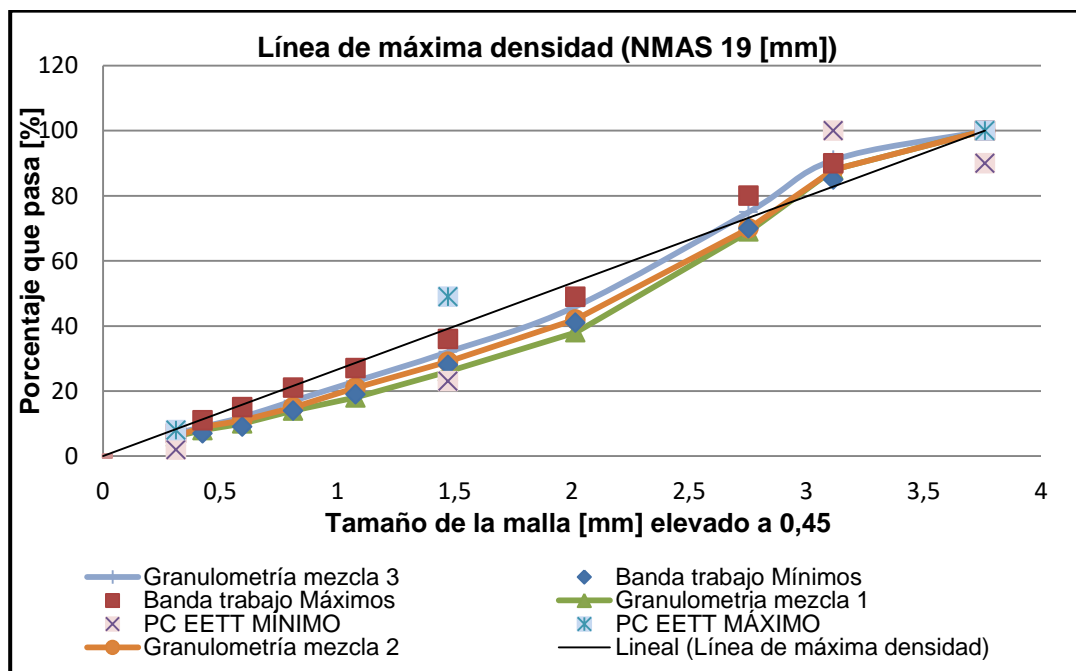
Mezcla de prueba 3- NMA5 19 [mm]							
% usado	15	35	50	Mezcla de prueba	Banda granulometrica	puntos control EETT	Tamiz [mm]
Tamiz ["]	Gravilla 3/4	Gravilla 1/2	Polvo Roca				
3/4"	100	100	100	100	100	90-100	19
1/2"	38	100	100	91	85-90	100	12,5
3/8	2	70	100	75	70-80		9,5
N°4	1	5	88	46	41-49		4,75
N°8	1	2	62	32	28-36	23-49	2,36
N°16	1	2	45	23	19-27		1,18
N°30	1	2	32	17	14-21		0,63
N°50	1	2	23	12	9-15		0,315
N°100	1	2	17	9	7-11		0,15
N°200	0,8	1,6	12,6	7	5,5-7,0	2-8	0,075



Gráfica 6-4 Distribución granulométrica mezcla 2

Las 3 mezclas cumplen con los puntos de control de las especificaciones y la banda de trabajo diseñada. Trazando una línea desde el origen hasta el 100 por ciento de material que pasa por el tamiz de tamaño máximo nominal que es 19 [mm], obtenemos la recta para la máxima densidad, en una gráfica de potencia 0.45; ésta es la gráfica 6-5.

Los PCS (Primary Control Sieve) indican la malla que separa lo que es considerado agregado grueso del agregado fino. Para el caso de un N^o 19 [mm] el PCS equivale a la malla N^o 4. Las granulometrías de las mezclas gruesas pasan por debajo de la línea de máxima densidad, esto implica además que la proporción de polvo/asfalto para el diseño de la mezcla puede aumentarse al rango de 0.8-1.6.



Gráfica 6-5 Granulometrías para las mezclas de prueba comparadas con la línea de máxima densidad

Es conveniente volver a calcular las gravedades específicas para las mezclas de agregado. Para esto se realiza un promedio ponderado considerando los porcentajes en masa del tipo de agregado incorporado a la mezcla. Los porcentajes y los resultados están en la Tabla 6-11

Tabla 6-11 Gravedades específicas para cada mezcla de prueba

Estructura	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
%AS-1679-1	20	20	15
%AS-1679-2	39	35	35
%AS-1679-3	41	45	50
Promedio ponderado Gravedad específica			
Gmb	2648	2645	2640
Gsa	2783,0	2782,0	2781,0

Con el mismo criterio de ponderación por masa se vuelven a calcular las propiedades de consenso y de origen para las 3 mezclas del agregado de prueba. Los resultados se indican en la Tabla 6-12.

Tabla 6-12 Propiedades de consenso y origen para las mezclas de árido de las granulometrías de prueba

Propiedades de consenso	Granulometría #1	Granulometría #2	Granulometría #3	Requerimiento EETT
Angularidad del Agregado Grueso (1 o más caras) [%]	100	100	100	100 mín
Angularidad del Agregado Grueso (2 o más caras) [%]	97	97	97	90 mín
Angularidad del Agregado Fino [%]	51	51	51	
Partículas Lajeadas [%]	0,27	0,25	0,25	8 máx.
Equivalente de Arena [%]	57	57	57	45 mín.
Propiedades de origen				
Tenacidad [%]	13,6	13,7	13,91	25 máx.
Desintegración por Sulfato de Sodio	3,4	3,4	3,4	10 máx.
Desintegración por Sulfato de Magnesio	4,5	4,5	4,5	13 máx.
Materiales Deletéreos [%]	0,3	0,4	0,40	2 máx.

6.3.3. Estimación del porcentaje de asfalto inicial

Con el propósito de generar una probeta compactada con 4 por ciento de vacíos de aire, se utilizan las siguientes ecuaciones que buscan estimar cuánto debiese ser la cantidad de asfalto a incorporar en la mezcla para cumplir el requisito de diseño. Para esto se evalúan las relaciones volumétricas de la mezcla de agregado, realizando aproximaciones que buscan estimar el asfalto que será absorbido por el agregado y la cantidad necesaria para cubrir cada partícula.

6.3.3.1. Gravedad específica efectiva estimada (Gse)

La gravedad específica efectiva es la relación de la masa seca de una unidad de volumen de agregado (incluido tanto el volumen sólido del agregado como los vacíos permeables al agua no llenos de asfalto absorbido como se muestra en la imagen 6-10) a la masa del mismo volumen de agua. Este parámetro se calcula con la ecuación 6-1; y los resultados se expresan en la Tabla 6-13.

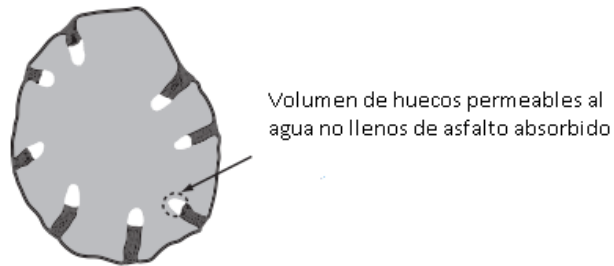


Imagen 6-10 huecos del agregado recubierto permeables al agua no llenos de asfalto absorbido [13]

$$Gse(est) = Gsb + 0,8 * (Gsa - Gsb)$$

Ecuación 6-1 Ecuación para calcular la Gravedad específica efectiva estimada [14]

Donde:

- $Gse(est)$: Gravedad específica efectiva estimada.
- Gsb : Gravedad específica bruta de la mezcla de agregado.
- Gsa : Gravedad específica aparente de la mezcla de agregado.

Tabla 6-13 Gravedad específica efectiva estimada

		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Gsa	Gravedad específica aparente (g/cm ³)	2,783	2,782	2,781
Gsb	Gravedad específica bruta seca (g/cm ³)	2,648	2,645	2,64
Gse	Gravedad específica efectiva estimada (g/cm ³)	2,756	2,7546	2,7528

6.3.3.2. Volumen de asfalto absorbido estimado.

Equivale a la estimación de la cantidad de asfalto que es absorbido por el agregado y debe calcularse con la ecuación 6-2. Los resultados se expresan en la Tabla 6-14.

$$Vba(est) = \frac{Ps * (1 - Va)}{\left(\frac{Pb}{Gb} + \frac{Ps}{Gse(est)}\right)} * \left(\frac{1}{Gsb} - \frac{1}{Gse(est)}\right)$$

Ecuación 6-2 Ecuación para el volumen de asfalto absorbido estimado [14]

Donde

Vba: Volumen absorbido del ligante en cm^3/cm^3 de mezcla.

Pb: Porcentaje de ligante con respecto al total de la mezcla.

Ps: Porcentaje de agregado con respecto al total de la mezcla.

Gb: Gravedad específica del ligante.

Va: Volumen de vacíos de aire.

Gse(est): Gravedad específica efectiva estimada.

Gsb: Gravedad específica bruta.

Tabla 6-14 Resumen cálculo del volumen de asfalto absorbido estimado

		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Ps	Porcentaje de agregados con respecto al total del peso de la mezcla. (%)	95	95	95
Pb	Porcentaje de ligante con respecto al total del peso de la mezcla. (%)	5	5	5
Gb	Gravedad específica del ligante (g/cm^3)	1,02	1,02	1,02
Va	Vacíos de aire recomendado [%]	4	4	4
Vba	Volumen de asfalto absorbido (%)	3,428	3,483	3,592

6.3.3.3. Volumen de asfalto efectivo estimado

Equivale a la estimación de la cantidad de asfalto que recubre cada partícula del agregado sin incluir el asfalto absorbido por los poros. Se calcula con la ecuación 6-3 y los resultados se resumen en la Tabla 6-15.

$$Vbe(est) = 0,081 - 0,02931 * [\ln(Sn)]$$

Ecuación 6-3 Ecuación para el volumen de asfalto efectivo [14]

Donde

Sn: es el tamaño del tamiz tamaño máximo nominal de la mezcla de agregados (en pulgadas).

Tabla 6-15 Resumen cálculo volumen de asfalto efectivo estimado

		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Sn (")	Tamaño Máximo del agregado mineral en pulgadas	0,750	0,750	0,750
Vbe	Vbe (est) (%)	8,943	8,943	8,943

6.3.3.4. Porcentaje de asfalto inicial

Corresponde a la cantidad de asfalto inicial para incorporar a las mezclas de prueba; esta se calcula considerando las estimaciones anteriores que se basan en las relaciones volumétricas del agregado. Debe calcularse con la ecuación 6-4 en complemento con la ecuación 6-5 y los resultados se resumen en la Tabla 6-16.

$$Pbi = \frac{Gb * (Vbe(est) + Vba(est))}{Gb * (Vbe(est) + Vba(est)) + Ws}$$

Ecuación 6-4 Ecuación para el porcentaje de asfalto inicial [14]

Donde:

- *Gb*: Gravedad específica del ligante [g/cm^3].
- *Ws*: Peso del agregado seco en gramos.

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

Ecuación 6-5 Ecuación para el peso seco del agregado en gramos [14]

Tabla 6-16 Resumen cálculo porcentaje de asfalto inicial

		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Gb	Gravedad específica del ligante (g/cm ³)	1,020	1,020	1,020
Vbe	Volumen de ligante efectivo estimado	0,089	0,089	0,089
Vba	Volumen de asfalto absorbido	0,034	0,035	0,036
Ws	Peso del agregado seco (g/cm ³)	2,316	2,315	2,314
Pbi	Porcentaje de asfalto inicial (%)	5,166	5,190	5,236

Para la realización de las mezclas de prueba se recomienda elegir un porcentaje de asfalto inicial igual para cada mezcla; esto se realiza promediando los 3 porcentajes calculados, arrojando un 5,2 por ciento de asfalto inicial para incorporar a cada mezcla de prueba.

6.3.4. Temperaturas de Mezclado y Compactación

La temperatura de mezclado será de 170 ± 5 ° C y la de compactación 155 ± 10° C.

6.3.5. Mezclado

Antes de comenzar, el asfalto y el árido deben llevarse a la temperatura de mezclado durante al menos dos horas antes. Para esto se confecciona la granulometría dentro de cuencas de metal resistentes a altas temperaturas y de dimensiones que permitan trabajar con masas totales de áridos inferior a 6000 [gr]. Para el caso de una probeta de 150 [mm] de diámetro y 115 ± 5 [mm] de altura deben usarse masas cercanas a los 4700 [gr], considerando que las gravedades específicas del agregado varían entre 2,55 y 2,70. Se deja secando el árido a 200°C en el día previo a la confección de las probetas. Esta temperatura sobrepasa a la de mezclado, con el fin de suplir los efectos por pérdida de calor al momento de manipular los instrumentos, pesar, incorporar asfalto y revolver. El asfalto debe cumplir estrictamente 2 horas en el horno a 180°C, previo al mezclado, ya que de sobrepasarse podría sufrir un envejecimiento anticipado. Paralelamente debe mantenerse un horno a 135°C para el proceso de envejecimiento.

Durante todo el procedimiento se hace necesario utilizar una pistola-termómetro con láser digital infrarrojo para corroborar las temperaturas requeridas.

El proceso de mezclado comienza cuando se retira del horno el cuenco de metal con la granulometría dentro; debe colocarse sobre una balanza electrónica (sobre ésta es recomendable colocar una superficie de madera, para evitar el sobrecalentamiento de la balanza (Ver imagen 6-11), y una vez estabilizado el peso, este se lleva a cero para poder incorporar la masa de asfalto desde el tarro metálico previamente calentado. Es aconsejable revolver y formar un cráter en el agregado en donde verter el asfalto; en caso de exceder la masa del aglutinante se puede retirar rápidamente con una espátula caliente.

El método para el mezclado será manual; se revuelve con una poruña metálica por un integrante del equipo de trabajo. Mientras se revuelve, el cuenco con la mezcla debe permanecer sobre una cama de arena caliente, que debe ser puesta con 30 minutos de anticipación sobre fuego encendido desde una cocinilla (Ver imagen 6-12). Se debe revolver rápidamente para mantener el calor y no perder temperatura, logrando cubrir completamente las partículas del agregado con el aglutinante.

Una vez mezclado, el cuenco se introduce en el horno a 135°C para comenzar su periodo de envejecimiento. Según la norma AASHTOR30 se recomiendan 4 horas de envejecimiento para agregados de alta absorción, siendo en este caso cercano al 2 % (ver Tabla 6-3). En el período de envejecimiento, es necesario revolver cada 60 minutos para mantener el acondicionamiento uniforme y permitir la absorción del asfalto por parte de las partículas.

Pasadas las 4 horas de envejecimiento, debe elevarse la temperatura de la mezcla para la compactación; para esto se introduce en un horno a 170° C durante aproximadamente 30 minutos.

Durante el periodo de envejecimiento es necesario dejar los moldes de compactación con sus respectivos platos en el horno a la temperatura de compactación. Es recomendable introducir el plato inferior en el molde y luego meter al horno, para facilitar las maniobras posteriores.



Imagen 6-11 Cuenco metálico con granulometría de prueba previo a la incorporación del asfalto



Imagen 6-12 Mezclado manual con poruña metálica sobre una cama de arena calentada en una cocinilla

6.3.6. Compactación

Antes de compactar es necesario preparar papeles circulares untados con algún líquido desmoldante. Estos papeles se colocan entre los platos del molde y la mezcla asfáltica al ser introducida; mejorando el desmolde entre la probeta compactada de mezcla asfáltica y los platos metálicos.

El compactador giratorio debe estar calibrando siguiendo las instrucciones del “Manual de operación e instrucción, modelo 5850 de la Marca Troxler”. Al calibrarlo debe ajustarse según si se requieren números de giros o una altura específica para la probeta. Esto va a depender de la etapa del proceso y del ensayo que se requiera realizar.

Cuando la mezcla adquiera la temperatura de compactación, se retira del horno junto con un molde y plato correspondiente, que deben ser colocados en un lugar despejado para trabajar y cercano al compactador. Un operador debe untar una pequeña cantidad de desmoldante por las paredes del molde e introducir un papel untado con el líquido. Un segundo operador revuelve la mezcla dentro del cuenco de metal para así soltar los finos pegados a las paredes. Una vez que el primer operador tenga el molde listo, el segundo operador introduce la mezcla dentro del molde cuidando de no perder material en la maniobra; es recomendable raspar con una espátula las paredes del cuenco evitando la pérdida de cualquier agregado fino de la mezcla. Rápidamente se nivela la superficie de la mezcla dentro del molde y se coloca un segundo papel. Se deja caer el segundo plato dentro del molde y se introduce dentro del compactador para dar inicio a la máquina.

Completados los 115 giros del compactador giratorio se saca el molde de la máquina y se deja enfriar por unos 30 minutos aproximadamente. El molde seguirá caliente después de los 30 minutos, por esto, se debe tener cuidado al desmoldar la probeta compacta. Se usa una prensa móvil ejerciendo presión manual. Se deja enfriar la probeta a temperatura ambiente logrando unos 25°C. Con la probeta a esta temperatura se procede a realizar los siguientes ensayos.

6.4. Determinación de la gravedad específica bruta (gmb)

Pesar la probeta seca a temperatura ambiente registrando la masa como “A”. (Ver imagen 6-13). Se sumerge por completo la probeta compactada en un baño de agua a 25°C durante 4 minutos y se determina la masa cuando se estabilice el marcador digital (Ver imagen 6-14). Registrar esta masa como “C”. En caso de que la temperatura de la probeta difiera de la del baño de agua en más de 2° C, se deja la probeta 15 minutos dentro del

agua. Debe secarse la probeta rápidamente con una toalla de tela húmeda para conseguir la condición SSD (Ver imagen 6-15), y luego se pesa en el aire y registrarse esta masa como "B". Los resultados se pueden ver en la tabla 6-17.

Tabla 6-17 Gravedad específica bruta de las mezclas de prueba para una absorción de menos del 2 por ciento

Para Absorción H ₂ O <2%						
Probeta N°	#1-1	#1-2	#2-1	#2-2	#3-1	#3-2
(A) Masa seca al aire [g]	4640,5	4609,4	4625,2	4654,6	4646,8	4607,1
(B) Probeta saturada superficialmente seca [g]	4648,2	4621,8	4654,1	4659,6	4654,1	4615,5
(C) Masa de la probeta sumergida en agua a 25°C [g]	2709,6	2692	2735,2	2739,1	2735,2	2706,7
G _m [g/cm ³]	2,394	2,389	2,410	2,424	2,422	2,414



Imagen 6-13 Peso en seco de la probeta



Imagen 6-14 Peso de la probeta sumergida en agua



Imagen 6-15 Secado de la probeta en tela húmeda para conseguir condición SSD

6.5. Determinación de la gravedad teórica máxima (Gmm)

Al preparar una mezcla, se siguen los mismos procedimientos antes mencionados, con la diferencia de que la mezcla para este ensayo no se somete a envejecimiento ni compactación. Para los cálculos se debe tener el registro de la masa del matraz lleno de agua hasta la línea de aforo.

Preparada la mezcla y mientras todavía esté caliente y manipulable debe esparcirse en una superficie no propensa a la adhesión. Se separan las partículas a mano, teniendo cuidado de evitar la fractura del agregado (Ver Imagen 6-16). Enfriar la muestra a temperatura ambiente. Una vez fría, cuartear la muestra para que las 2 porciones sean uniformes en su composición. Registrar estas masas.

Introducir la muestra en un matraz aforado y agregar agua a 25° C, suficiente para cubrir completamente la muestra y sobrepasar aproximadamente unos 3 [cm] de la superficie. Debe taparse el matraz y conectarse a una bomba de vacío a una presión de 3,7 [kPa]. Comenzar inmediatamente agitando y/o golpeando el matraz con la mezcla dentro para retirar el aire atrapado. Mantener la operación durante 15 minutos. Terminado el tiempo, liberar la presión gradualmente y quitar la tapa de goma.

Llenar el matraz con agua a 25 °C hasta la línea de aforo, cuidando de no introducir aire en la muestra. Luego pesar y registrar la masa "E". El cálculo de las densidades se muestra en la tabla 6-18.

Tabla 6-18 Gravedad máxima teórica de las mezclas de prueba

Muestra	Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3	
Probeta	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2
Gmm	2,469	2,469	2,481	2,481	2,486	2,486



Imagen 6-16 Separación de las partículas recubiertas de asfalto para la determinación del Gmm

6.6. Análisis de los datos del compactador

El número de giros de diseño es 75, según las especificaciones técnicas para el proyecto. Se rescatan desde la memoria del compactador giratorio los resultados que indican la altura de la probeta a su correspondiente número de giro. Según el criterio de la metodología Superpave, deben rescatarse las alturas para los números de giros inicial, de diseño y máximo, para este caso, 7, 75 y 115 respectivamente.

La gravedad específica bruta de una probeta compacta es la relación entre su masa seca y su volumen, que contiene asfalto, agregado y aire. La probeta es irregular en su geometría, lo que altera en menor grado el cálculo de su volumen al asemejarlo a un cilindro. Aun así, puede estimarse el volumen de esta probeta ocupando el cálculo volumétrico para un cilindro. Por lo anterior la gravedad específica bruta puede estimarse con la ecuación 6-6. Los resultados se expresan en las Tablas 10-1, 10-2 y 10-3 que se encuentran en los Anexos.

$$Gmb(estimada) = \frac{Ws[gr]}{\frac{\pi * D[mm]^2}{4} * ht[mm]} * 1000[\frac{gr}{cm^3}]$$

Ecuación 6-6 Ecuación para la determinación de la gravedad específica bruta estimada [14]

Donde:

- *Gmb(estimada)*: Gravedad específica bruta estimada de la probeta.
- *Ws*: peso en seco de la probeta compactada.
- *D*: diámetro de la probeta, 150 [mm].
- π : 3,1416.
- *ht*: altura de la probeta durante la compactación.

Realizado el ensayo de inmersión bajo el agua para medir la gravedad específica bruta (punto 6.4), es factible calcular un factor de corrección (C) que relacione la gravedad específica bruta estimada a los *Nmáx*, con la gravedad específica bruta medida. Para esto ocupamos la ecuación 6-7. Los resultados se expresan en las Tablas 10-1, 10-2 y 10-3 que se encuentran en los Anexos.

$$C = \frac{Gmb(medida)}{Gmb(estimada)para Nmáx.}$$

Ecuación 6-7 Factor de corrección para la gravedad específica estimada a los *Nmáx* [14]

Donde:

- *C*: Factor de corrección.
- *Gmb(medida)*: Gravedad específica bruta medida según ensayo 6.4.
- *Gmb(estimada)*: Gravedad específica bruta estimada.

Con este factor es posible corregir el *Gmb* (estimado) aplicando la ecuación:

$$Gmb(corregido) = C * Gmb(estimado)$$

Ecuación 6-8 Determinación de la gravedad específica corregida [14]

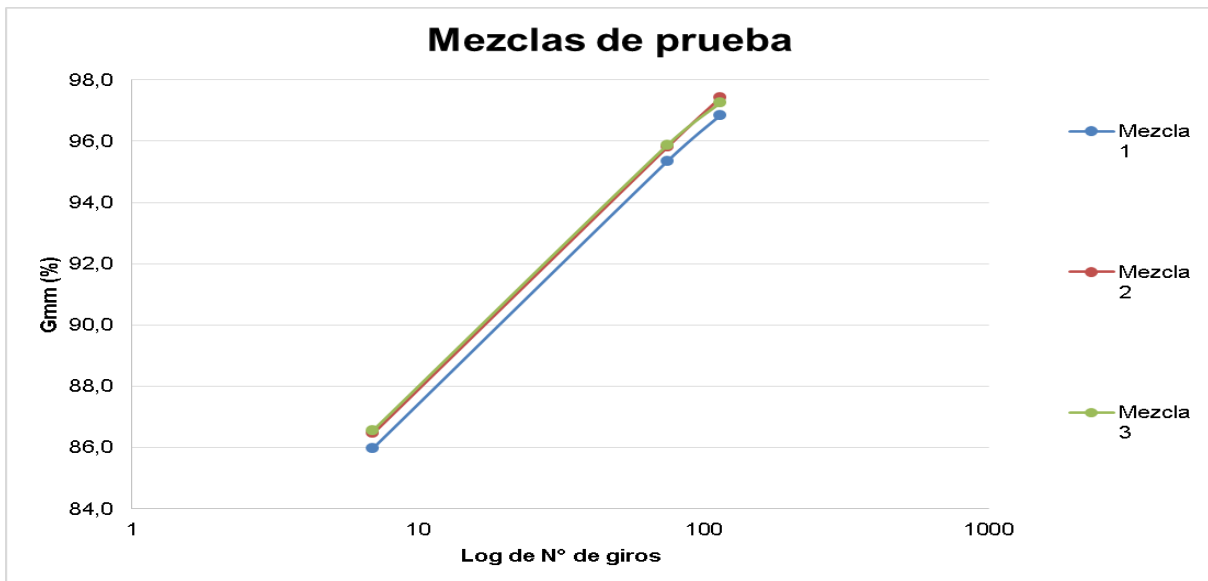
Luego debe calcularse el %Gmm para cada una de las probetas. Para esto se divide la gravedad específica bruta corregida por el valor medido de gravedad teórica máxima en el punto 6.5, correspondiente a cada mezcla. Los resultados se expresan en las Tablas 10-1, 10-2 y 10-3 que se encuentran en los Anexos.

El promedio del %Gmm de cada mezcla se usa como base de comparación entre las mezclas de prueba. Estos promedios se ven en la Tabla 6-22.

Tabla 6-19 Resumen %Gmm promedio de las probetas de prueba

%Gmm promedio			
N° giros	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Nini	86,0	86,5	86,6
Ndes	95,4	95,8	95,9
Nmáx	96,9	97,4	97,3

Se grafica una curva de densificación trazando el promedio de la gravedad máxima teórica medida para los números de giros versus el logaritmo del número de giros (Gráfica 6-6). Estas curvas de cada mezcla de prueba sirven para verificar los criterios de diseño de la metodología con respecto al 4 por ciento de vacíos de aire recomendados para los números de giros de diseño. Se considera que el cien por ciento de la mezcla compacta equivale a la suma de los porcentajes de gravedad teórica máxima y los vacíos de aire.



Gráfica 6-6 Gráfica del %Gmm con respecto al logaritmo en base 10 del número de giros.

6.7. Diseño volumétrico de la mezcla asfáltica.

A continuación se determinan matemáticamente las relaciones volumétricas de las probetas de prueba.

6.7.1. Vacíos de aire inicial (Va)

Estos consisten en los espacios de aire entre las partículas de áridos recubiertas con asfalto dentro de una probeta compactada. Comúnmente se calcula con la ecuación 6-9 y los resultados se muestran en la Tabla 6-20:

$$\%Va(inicial) = 100 - \%Gmm@Ndes$$

Ecuación 6-9 Ecuación para el porcentaje de aire inicial [15]

Donde:

- *Gmb*: Gravedad específica bruta calculada según el punto 6.4.
- *Gmm*: Gravedad específica bruta calculada según el punto 6.5.

Tabla 6-20 Cálculo de los vacíos de aire de las probetas de prueba

	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
% Vacíos de aire	4,65	4,19	4,12

6.7.2. Vacíos en el agregado mineral (VAM):

El VAM puede calcularse restando el volumen del agregado mineral, determinado por su gravedad específica seca (*Gsb*), del volumen total de la mezcla de pavimentación compactada, determinado por su gravedad específica bruta (*Gmb*). Se puede calcular con la ecuación 6-10, donde es necesario saber el porcentaje en peso del agregado con respecto al total de la mezcla (*Ps*). Los resultados se muestran en la Tabla 6-21.

$$VAM = 100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb}$$

Ecuación 6-10 Ecuación para los vacíos del agregado mineral [15]

Donde:

- *Ps*: Porcentaje en peso del agregado con respecto al total de la mezcla.
- *Gsb*: Gravedad específica bruta seca del agregado.

Tabla 6-21 Cálculo del porcentaje de vacíos en el agregado mineral para las probetas de prueba

		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Gmb	Gravedad específica bruta	2,354	2,377	2,384
Gsb	Gravedad específica bruta seca del agregado	2,64	2,645	2,648
Ps	Porcentaje de peso de agregados con respecto al total de la mezcla [%]	94,8	94,8	94,77
VAM	Vacíos del agregado mineral [%]	15,5	14,8	14,7

6.7.3. Porcentaje de asfalto estimado

Este porcentaje es un valor estimado de la cantidad de asfalto que debería haberse agregado a la mezcla de prueba para lograr el 4 por ciento de vacíos de aire en la mezcla compactada. Se calcula con la ecuación 6-11 y los resultados aparecen en la Tabla 6-22.

$$Pb(estimado) = Pb(inicial) - 0,4 * (4,0 - Va(inicial))$$

Ecuación 6-11 Ecuación para el porcentaje de asfalto estimado [15]

Donde:

- $Pb(estimado)$: Porcentaje de asfalto estimado.
- $Va(inicial)$: porcentaje de vacíos de aire según punto 6.7.1.
- 0,4: pendiente de la curva del % de aire vs % asfalto
- 4: porcentaje de vacíos de diseño recomendado

Tabla 6-22 Cálculo del porcentaje de asfalto estimado

		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Va ini	Porcentaje de aire en la mezcla inicial	4,65	4,19	4,12
Pb ini	Porcentaje de asfalto inicial	5,166	5,19	5,23
S	Pendiente de curva %aire vs %asfalto	0,4	0,4	0,4
Va	Vacíos de aire recomendado [%]	4	4	4
Pbe	Porcentaje de asfalto estimado	5,43	5,27	5,28

6.7.4. Vacíos del agregado mineral estimado

El VAM en una mezcla compactada es el resultado de las propiedades del agregado, las propiedades del aglutinante, la temperatura y quizás el más significativo, el tipo y la cantidad de esfuerzo de compactación ejercido sobre la muestra. Los cambios mínimos en el contenido del aglutinante, muy cerca del contenido del valor de diseño, tienen poco efecto sobre el VAM, pero se tiene en cuenta en el valor de C. Debe calcularse con la ecuación 6-12 y los resultados se ven en la Tabla 6-23.

$$VAM(estimado): VAM(inicial) + C * (4,0 - Va(inicial))$$

Ecuación 6-12 Ecuación para los vacíos del agregado mineral estimado [15]

Donde:

- $VAM(estimado)$: vacíos del agregado mineral usando para el porcentaje de asfalto estimado.
- $VAM(inicial)$: vacíos del agregado mineral calculado en 6.7.1.
- C : constante que depende del valor de vacíos de aire de diseño; 0,1 si $Va < 4\%$ o 0,2 si $Va > 4\%$.
- 4,0: Vacíos de aire de diseño recomendado.

Tabla 6-23 Cálculo de los vacíos del agregado mineral estimado

		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
VAM ini	Vacíos del agregado mineral inicial	15,47	14,81	14,70
C	$C = 0.1$ si $Va < 4\%$; 0.2 si $Va > 4\%$	0,2	0,2	0,2
Va ini	Porcentaje de vacíos de aire inicial	4,65	4,19	4,12
Va	Vacíos de aire recomendado [%]	4	4	4
VAM est	vacíos del agregado mineral estimado	15,34	14,77	14,67

6.7.5. Vacíos rellenos con asfalto estimado

Los vacíos rellenos de asfalto es el porcentaje en volumen del VAM que se llena con el ligante asfáltico efectivo; deben calcularse con la ecuación 6-13 y los resultados se ven en la Tabla 6-24.

$$VFA(est) = 100 * \frac{(VAM(estimado) - 4,0)}{VAM(estimado)}$$

Ecuación 6-13 Ecuación para el cálculo de los vacíos rellenos de asfalto estimado [15]

Tabla 6-24 Cálculo de los vacíos rellenos de asfalto estimado

		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
VAM est	VMA estimated	15,34	14,77	14,67
Va	Vacios de aire de diseño recomendado	4	4	4
VFA est	Vacíos rellenos de asfalto estimado	73,92	72,91	72,74

6.7.6. Porcentaje de asfalto efectivo estimado

Corresponde a la porción funcional del aglutinante de asfalto que recubre el agregado en la mezcla de asfalto, pero no se absorbe en el agregado. Representa un porcentaje de la masa total de la mezcla. Debe calcularse con la ecuación 6-14 y los resultados se ven en la Tabla 6-25.

$$Pbe(est) = Pb(est) - (Ps * Gb) * \frac{(Gse - Gsb)}{(Gse * Gsb)}$$

Ecuación 6-14 Ecuación para el cálculo del porcentaje de asfalto efectivo estimado [15]

Donde:

- *Gb*: Gravedad específica del asfalto.
- *Gse*: Gravedad específica efectiva estimada

Tabla 6-25 Resultados para el porcentaje de asfalto efectivo estimado

		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Pbest	Porcentaje de asfalto estimado	5,43	5,27	5,28
Ps	Porcentaje del agregado seco con respecto al total	95,08	95,09	95,11
Gb	Gravedad específica del asfalto	1,021	1,021	1,021
Gse	Gravedad específica efectiva estimada	2,756	2,757	2,756
Gsb	Gravedad específica bruta de la gregado	2,668	2,669	2,670
Pbee	Porcentaje de asfalto efectivo estimado	4,26	4,11	4,14

6.7.7. Proporción de polvo

La proporción de polvo se calcula como el porcentaje en masa del material que pasa el tamiz de 0,075 [mm] dividido por el contenido efectivo de asfalto (expresado como porcentaje en masa de la mezcla). El rango permitido para esta propiedad es 0.8-1.6, esto

se justifica por ser granulometrías de mezclas gruesas (revisar Gráfica 6-5). La ecuación es la 3-15, y el resultado se ve en la Tabla 6-26.

$$DP = \frac{P_{0.075}}{P_{be(est)}}$$

Ecuación 6-15 Ecuación para la proporción de polvo [15]

Tabla 6-26 Cálculo de la proporción de polvo

		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
P_{bee}	Porcentaje de asfalto efectivo estimado	4,26	4,11	4,14
P 0.075	Porcentaje que pasa el tamiz de 0.075 [mm]	6,70	4,95	4,68
DP	Proporción de polvo	1,57	1,20	1,13

6.7.8. Porcentaje de Gmm estimado para los números de giros de diseño.

La ecuación para calcular este parámetro es la 3-16. Los resultados se muestran en la Tabla 6-27.

$$\%Gmm(est)@N = \%Gmm(prueba)@N - (4 - Va)$$

Ecuación 6-16 Ecuación para estimar el porcentaje de gravedad máxima teórica según el número de giros. [15]

Donde:

- $\%Gmm(est)@N$: Porcentaje de gravedad máxima teórica estimado correspondiente al número de giros.
- $\%Gmm(prueba)@N$: Porcentaje de gravedad máxima teórica de prueba correspondiente al número de giros.
- 4: Vacíos de aire de diseño recomendado.
- Va : Vacíos de aire inicial calculado en el punto 6.7.5.

Tabla 6-27 Cálculo del porcentaje de Gmm estimado según el número de giros

	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
%Gmm@N ini	86,0	86,5	86,6
%Gmm@N max	96,8	97,4	97,2
%Vacíos diseño	4	4	4
Porcentaje de vacíos de aire inicial	4,65	4,19	4,12
%Gmm estimado @N ini	86,64	86,66	86,69
%Gmm estimado @N max	97,50	97,61	97,37

6.8. Determinación de la estructura del agregado de diseño.

Debe seleccionarse la mezcla que cumpla de mejor manera con los criterios de la metodología; asemejándose los valores obtenidos para las gravedades teóricas máximas, los vacíos en el agregado mineral, los vacíos rellenos de asfalto y la proporción de polvo/asfalto a los dictados por Superpave. Ver Tabla 6-28.

Tabla 6-28 Resumen comparación mezclas de prueba bajo el diseño volumétrico SUPERPAVE

Relación Volumétrica	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Criterio SUPERPAVE
%Gmm @ N ini	86,64	86,66	86,69	≤90,5
%Gmm @ N des	96,00	96,00	96,00	96
%Gmm @ N max	97,50	97,61	97,37	≤98
VAM [%]	15,34	14,77	14,67	Mín 13
VFA [%]	73,92	72,91	72,74	65-78
DP	1,57	1,20	1,13	0,8-1,6
Pb est [%]	5,43	5,27	5,28	5,2 (*)
Va [%]	4,65	4,19	4,12	4

(*) Este valor es el promedio del Porcentaje de asfalto inicial calculado para cada mezcla de prueba. Ver punto 6.3.3.4. No corresponde a un criterio fijo de SUPERPAVE.

La mezcla 3 cumple con mayor exactitud con los criterios SUPERPAVE; teniendo una mayor cercanía al 4 por ciento de vacíos de aire. Con esta estructura de agregado se procede a seleccionar el porcentaje de asfalto de diseño, para esto es necesario realizar nuevas probetas, manteniendo la granulometría escogida.

6.9. Selección del porcentaje de asfalto de diseño.

Deben prepararse 2 probetas mínimo para:

- Contenido estimado de asfalto.
- Contenido estimado de asfalto $\pm 0.5 \%$
- Contenido estimado de asfalto $+1 \%$

Con estos datos se obtienen 4 puntos de comparación en relación al contenido de asfalto, y deberán graficarse las relaciones volumétricas para verificar el comportamiento de la estructura de diseño. Es necesario confeccionar mínimo 2 probetas compactas y 2 muestras sueltas por mezcla para las gravedades específicas. Los porcentajes se diferencian por número de probeta y se ven en la Tabla 6-29.

Tabla 6-29 Porcentajes de asfalto para las probetas de diseño

	Probeta 1-2	Probeta 3-4	Probeta 5-6	Probeta 7-8
Porcentaje de asfalto estimado elegido [%]	5,25	4,75	5,75	6,25

El procedimiento en laboratorio para el mezclado y la compactación sigue las mismas etapas descritas en los puntos 6.3.5 y 6.3.6.

Realizadas las probetas y estando a temperatura ambiente deben ensayarse para determinar sus gravedades específicas brutas según el punto 6.4. También se preparan las muestras para realizar los ensayos de gravedad teórica máxima según el punto 6.5.

El resumen de los resultados para las gravedades específicas brutas y teóricas máximas para cada probeta se ven en la Tabla 6-30. Los resultados para las gravedades teóricas máximas se encuentran en las Tablas 10-4, 10-5, 10-6, 10-7, en el capítulo Anexos.

Tabla 6-30 Gravedades específicas brutas y teóricas máximas para las probetas de diseño

Probeta N°		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
A	Masa seca al aire [g]	4636,2	4634,9	4624,8	4594,7	4629,9	4631,6	4804,1	4815,5
B	Probeta saturada superficialmente seca [g]	4641,7	4638,1	4644,8	4596,3	4625,9	4596,3	4805,4	4816,9
C	Masa de la probeta en agua a 25°C [g]	2734,1	2727	2727,8	2708,4	2736,2	2708,4	2833,7	2842,8
Gmb [g/cm ³]		2,430	2,425	2,413	2,434	2,450	2,453	2,437	2,439
Gmm [g/cm]		2537,3	2532,2	2490,2	2494,6	2477,9	2471,1	2455,8	2456,4

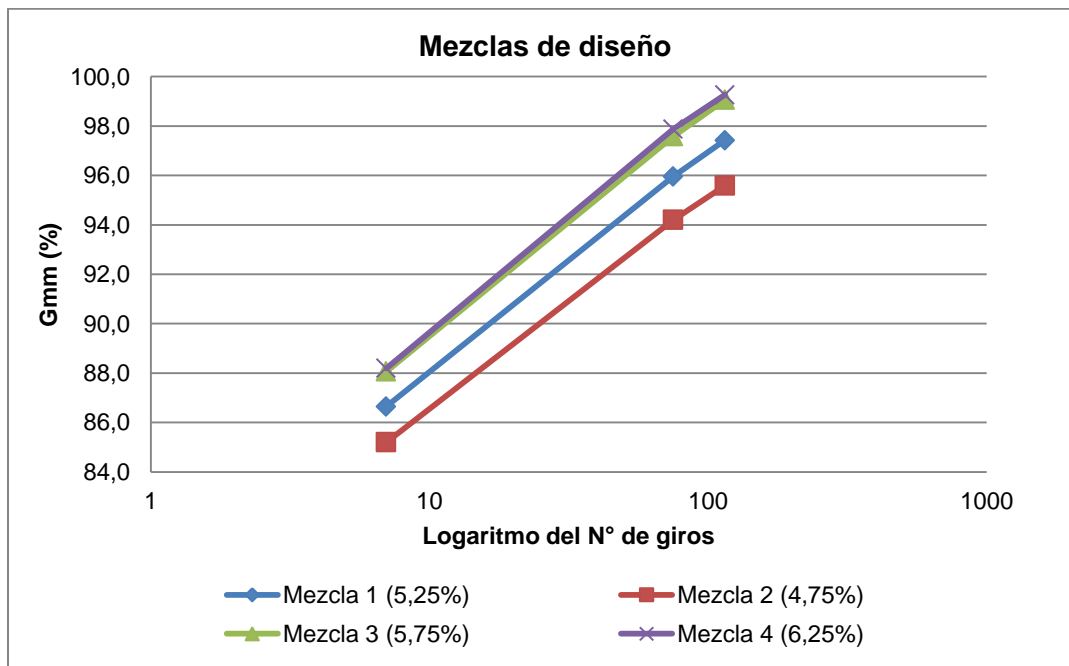
Obtenidas las gravedades específicas pueden corregirse los porcentajes de gravedad teórica máxima, utilizando los mismos procedimientos y criterios volumétricos del punto 6.6. Los resultados se presentan en las tablas 10-8, 10-9, 10-10 y 10-11, incorporadas en los Anexos.

Por último, debe determinarse el promedio del porcentaje de Gmm entre ambas probetas creadas para cada porcentaje de asfalto. Estos promedios se ven en la Tabla 6-31.

Tabla 6-31 Promedio de los %Gmm para las probetas de diseño

%Gmm promedio				
% asfalto	5,25	4,75	5,75	6,25
Nini	86,6	85,2	88,1	88,2
Ndes	95,9	94,2	97,6	97,9
Nmáx	97,4	95,6	99,1	99,3

Corresponde realizar la curva de densificación (Gráfica 6-7) y verificar la relación de gravedades teóricas máximas entre las mezclas. Las curvas superiores poseen menos cantidad de vacíos de aire y mayor contenido de asfalto, al contrario de las inferiores; esto indica la característica indirectamente proporcional de estos parámetros.



Gráfica 6-7 Curva de densificación de las probetas de diseño

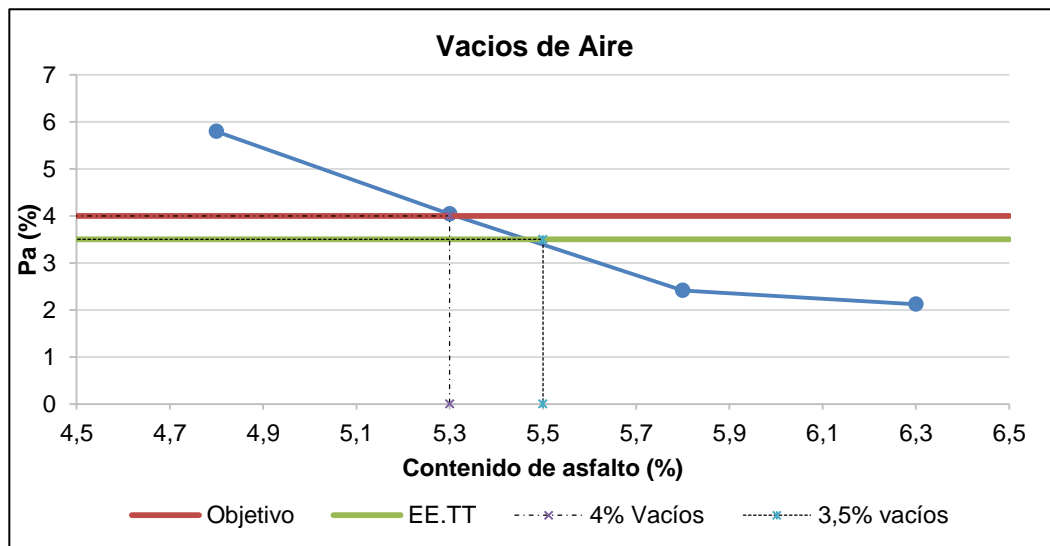
6.9.1. Diseño volumétrico para el contenido de asfalto final.

Los resultados para esta sección serán resumidos al finalizar la presentación de las ecuaciones en la tabla 6-32.

6.9.1.1. Vacíos de aire

A mayor contenido de asfalto los vacíos de aire disminuyen. El asfalto tiende a llenar los vacíos en la mezcla. Se debe enfatizar que el nivel de diseño Superpave para los vacíos de aire (4 por ciento) es el nivel deseado después de varios años de tráfico. Este nivel de diseño de vacíos de aire no varía en función del tráfico, sino que, es el esfuerzo de compactación del laboratorio el que varía, y debe seleccionarse para el tráfico esperado. Los vacíos de aire de diseño normalmente se lograrán si la mezcla está diseñada con el esfuerzo de compactación correcto y éste porcentaje después de la colocación en obra no es más del 8 por ciento. Se espera cierta densificación por la acción del tráfico. La consecuencia de un cambio en cualquier factor o en el procedimiento de diseño de mezcla será una pérdida de rendimiento o vida útil. [16]

El cálculo se realiza en base a lo especificado en 6.7.1. Los resultados para los distintos porcentajes de asfalto se aprecian en la gráfica 6-8 y se pueden ver en la tabla resumen 6-32.

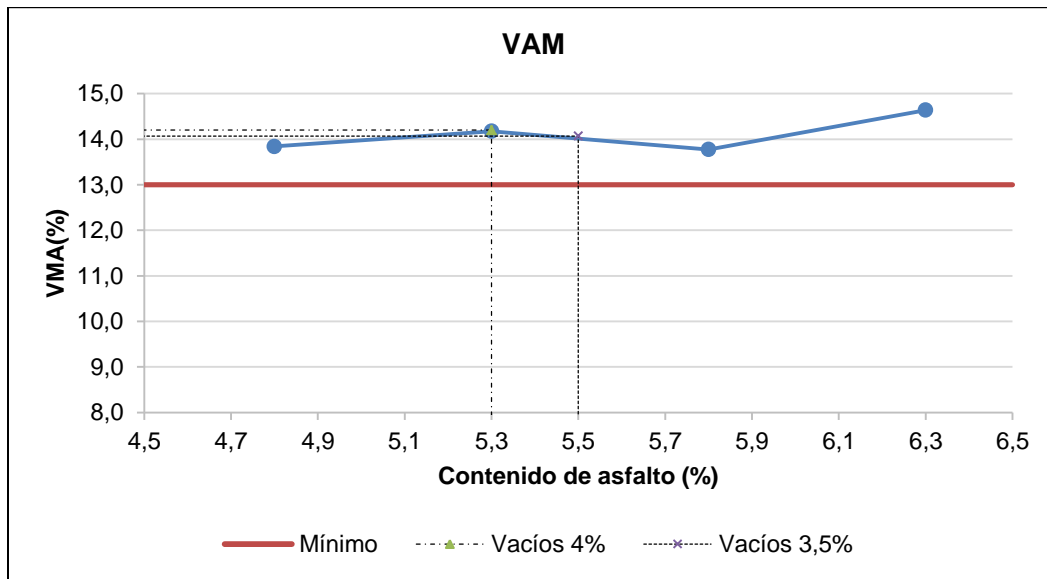


Gráfica 6-8 Relación entre los vacíos de aire y el contenido de asfalto

6.9.1.2. Vacíos en el agregado mineral

Se podría esperar que el VAM permanezca constante con diferentes contenidos de asfalto, pensando que los vacíos de aire simplemente serían llenados por el asfalto. En realidad, el volumen total cambia en todo el rango de contenido de asfalto. La suposición de un volumen de unidad constante no es precisa. Con el aumento de asfalto, la mezcla realmente se vuelve más manejable y se compacta más fácilmente, lo que significa que se puede comprimir más peso en el volumen de la unidad. Esto explicaría el repentino aumento a los 6,3 por ciento de contenido de asfalto que se aprecia en la gráfica 6-9.

El cálculo se realiza en base a lo especificado en 6.7.2. Los resultados se ven en la tabla resumen 6-32.



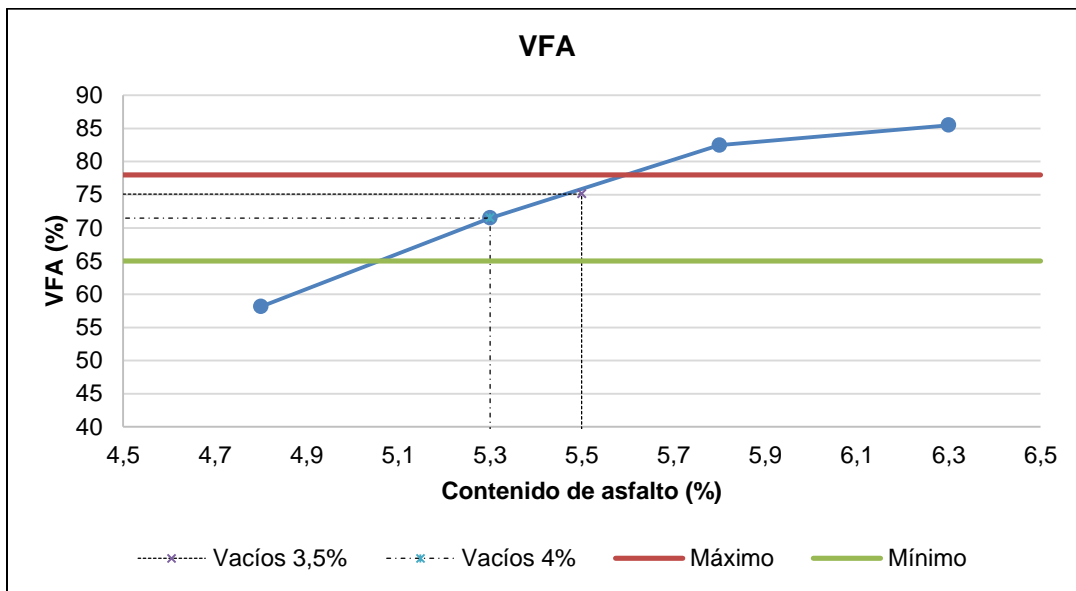
Gráfica 6-9 Relación entre el VAM y el contenido de asfalto

6.9.1.3. Vacíos rellenos de asfalto

Existe una evidente relación directa entre el aumento del VFA y más contenido de asfalto. Dentro de los vacíos de aire, existe una proporción que corresponde a los huecos que poseen las partículas del agregado, los cuales absorben el asfalto y son rellenados. A mayor contenido de asfalto existe una mayor tendencia a ser absorbido. El efecto principal de los criterios de VFA es limitar los niveles máximos de VAM y, posteriormente, los niveles máximos de contenido de asfalto. Este parámetro debe calcularse con la ecuación 6-17. Los resultados se ven en la gráfica 6-10 y en la tabla resumen 6-32.

$$VFA = 100 * \frac{VAM - Va}{VAM}$$

Ecuación 6-17 Ecuación para el cálculo de los vacíos rellenos de asfalto de las probetas de diseño [15]



Gráfica 6-10 Relación entre el VFA y el contenido de asfalto

6.9.1.4. Porcentaje de asfalto efectivo

Este parámetro debe ser calculado con la ecuación 6-18.

$$P_{be} = P_b - \frac{(G_{se} - G_{sb})}{(G_{se} * G_{sb})} * (G_b * P_s)$$

Ecuación 6-18 Ecuación para el cálculo del porcentaje de asfalto efectivo. [15]

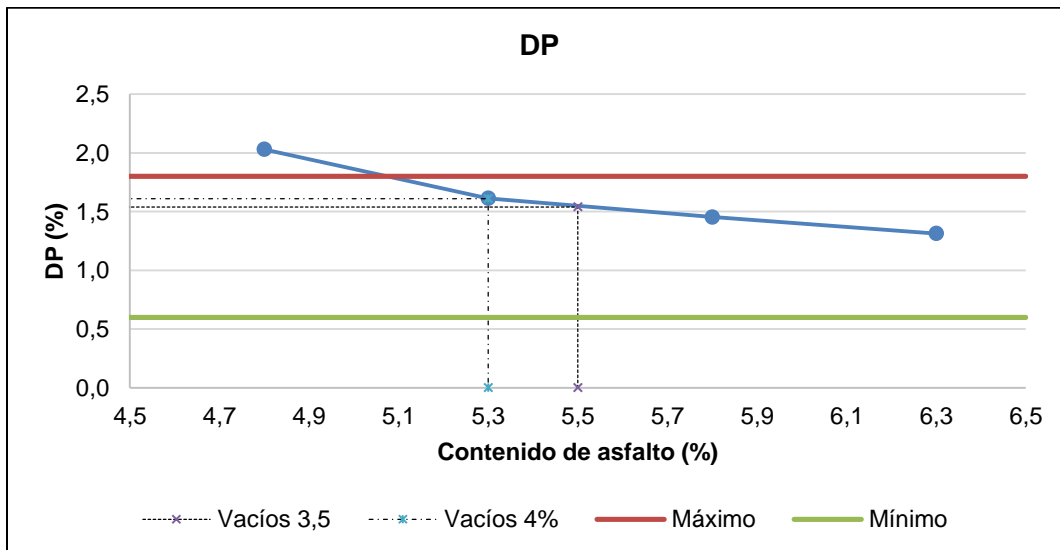
6.9.1.5. Proporción de Polvo

Una proporción de polvo/asfalto bajo a menudo resulta en una mezcla que carece de cohesión y es difícil de compactar en el campo porque tiende a moverse lateralmente debajo del rodillo. Las mezclas tienden a endurecerse a medida que aumenta el P0.075 (polvo), pero demasiado de este material también dará como resultado una mezcla no cohesiva. Este parámetro debe ser calculado con la ecuación 6-19.

$$DP = \frac{P_{0.075}}{P_{be}}$$

Ecuación 6-19 Ecuación para el cálculo de la proporción de polvo [15]

En general, para todas las relaciones volumétricas, la mezcla diseñada cumple con los criterios especificados, tanto para un diseño con 3,5 y 4 por ciento de vacíos de aire. Los resultados se aprecian en la gráfica 6-11 y en la tabla resumen 6-32.



Gráfica 6-11 Relación entre la proporción de polvo/asfalto y el contenido de asfalto

Tabla 6-32 Resumen relaciones volumétricas de las probetas de diseño finales

		Mezclas de diseño con				Criterio SUPERPAVE
		5,25	4,75	5,25	6,25	
	%asfalto					
Va	Vacíos de aire [%]	4,00	5,80	2,40	2,10	4,00
VAM	Vacíos de aire en el agregado mineral [%]	14,18	13,84	13,77	14,64	13,00
VFA	Vacíos rellenos de asfalto [%]	71,50	58,12	82,47	85,49	65-78
DP	Proporción de polvo/asfalto	1,61	2,03	1,45	1,31	0,8-1,6
Pbe	Porcentaje de asfalto efectivo [%]	4,33	3,44	4,80	5,31	

6.9.2. Diseño volumétrico en base a 3,5 % de vacíos de aire.

En base al diseño en las especificaciones técnicas para la conservación de pista del aeropuerto Arturo Merino Benítez; la mezcla debería diseñarse en base a una cantidad de 3,5 por ciento de vacíos de aire; esto implica una mayor densificación de la mezcla al ser puesta en obra. Al diseñar las mezclas asfálticas debe considerarse una densificación por carga vehicular en la pista, otorgada durante el primer período de servicio; en este caso se considera el paso de aviones. Estas máquinas circulan con menor frecuencia y ejercen mayor peso sobre el pavimento en comparación al tránsito vehicular. Los resultados que se han obtenido hasta ahora fueron realizados estrictamente bajo los criterios SUPERPAVE, que considera un buen desempeño de la mezcla teniendo un 4 por ciento de vacíos de aire.

Deben ocuparse las ecuaciones para estimar las relaciones volumétricas considerando el 6.5 por ciento de vacíos de aire. Las ecuaciones están desde los puntos 6.7.3 hasta el 6.7.7. Los resultados de estas ecuaciones se resumen en la Tabla 6-33.

Tabla 6-33 Relaciones volumétricas estimadas para las probetas de diseño considerando 3,5% de vacíos de aire

		Mezclas de diseño con				Criterio SUPERPAVE
Vacíos de aire = 3,5%		5,25	4,75	5,25	6,25	
	%asfalto					
Pb est	Porcentaje de asfalto estimado [%]	5,47	5,67	5,32	5,70	
VAM es	Vacíos de aire en el agregado mineral estimado [%]	14,07	13,4	14,0	14,9	13,0
VFA est	Vacíos rellenos de asfalto estimado [%]	75,12	73,84	74,98	76,53	65-78
Pbe est	Porcentaje de asfalto efectivo estimado [%]	4,54	4,36	4,37	4,76	
DP est	Proporción de polvo/asfalto estimado	1,54	1,61	1,60	1,47	0,8-1,6

Siguiendo el procedimiento del punto 6.7.8 se obtienen los %Gmm estimados para los números de giros de diseño inicial y máximo; los resultados se muestran en las tablas 6-35 y 6-36 respectivamente.

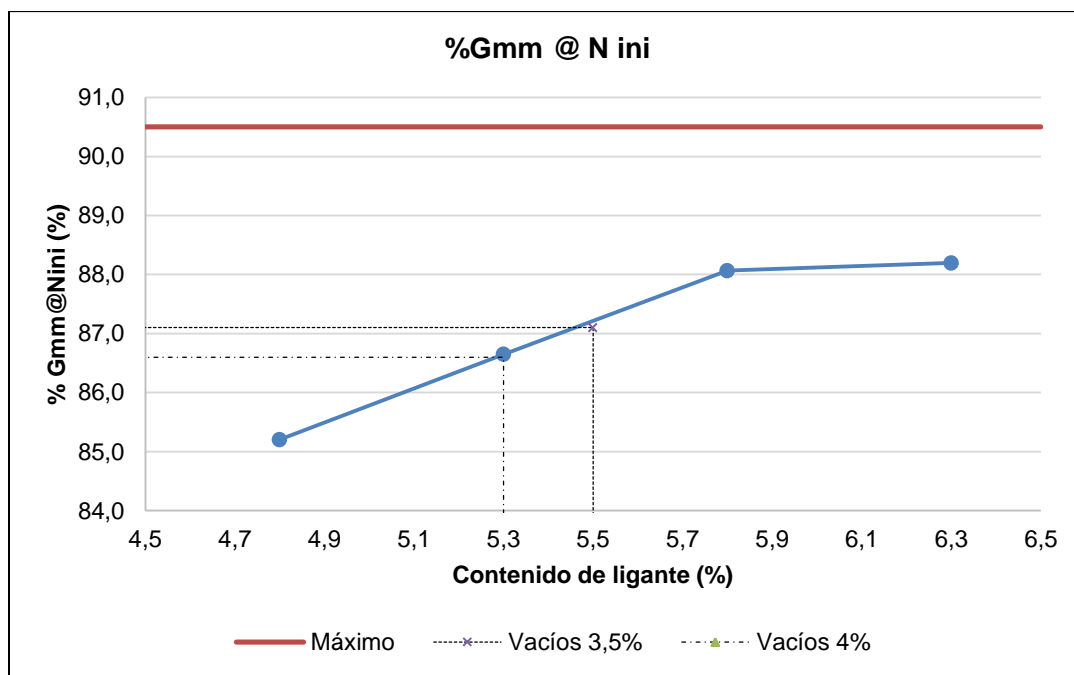
Tabla 6-34 Porcentaje del Gmm estimado para Nini con un contenido de vacíos igual a 3,5 por ciento

		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
%Gmm @Nini	Porcentaje de Gmm inicial para Nini	86,6	85,2	88,1	88,2
Va	Vacíos de aire para el diseño [%]	3,5	3,5	3,5	3,5
Pa ini	Vacíos de aire iniciales [%]	4,0	5,8	2,4	2,1
%Gmm est @Nini	%Gmm estimated@N ini	87,2	87,5	87,0	86,8

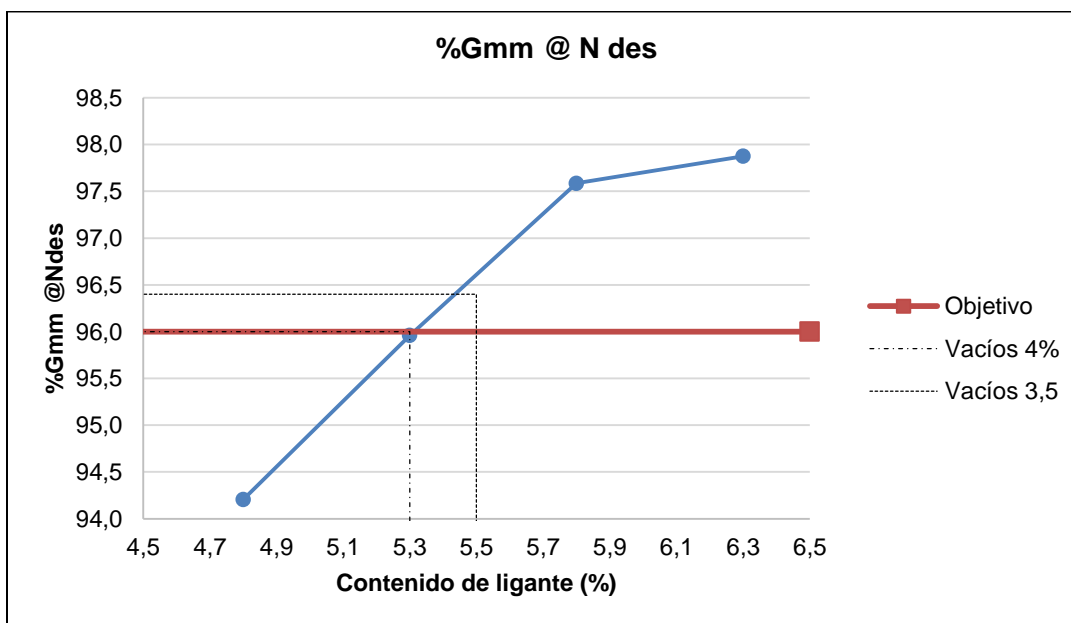
Tabla 6-35 Porcentaje del Gmm estimado para Nmax con un contenido de vacíos igual a 3,5 por ciento

		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
%Gmm @Nmax	Porcentaje de Gmm inicial para Nini	97,4	95,6	99,1	99,3
Va	Vacíos de aire para el diseño [%]	3,5	3,5	3,5	3,5
Pa ini	Vacíos de aire iniciales [%]	4,0	5,8	2,4	2,1
%Gmm est @Nmax	%Gmm estimated@N ini	98,0	97,9	98,0	97,9

Las gráficas comparativas para los %Gmm iniciales y de diseño, se muestran en la gráfica 6-12 y 6-13 respectivamente. Estas incluyen los 4% y 3,5% de vacíos de aire.



Gráfica 6-12 Porcentaje de Gmm a los números de giros iniciales según el contenido de asfalto



Gráfica 6-13 Porcentaje de Gmm a los números de giros de diseño según el contenido de asfalto

6.10. Susceptibilidad de la mezcla a la humedad (TSR)

El grado de susceptibilidad al daño por humedad se determina preparando un conjunto de 6 probetas compactadas en laboratorio a un contenido de vacío en el rango de 6 a 8 por ciento. Se utilizan probetas de 150 [mm] de diámetro y 62,5 [mm] de alto. El conjunto se divide en dos subconjuntos de 3 probetas cada uno con un contenido de vacíos similar. Un subconjunto se mantiene seco a temperatura ambiente mientras que el otro está parcialmente saturado con agua y humedad acondicionada. Debe medirse la altura de cada probeta. Las respectivas características de las probetas se ven en la tabla 6-36.

Tabla 6-36 Detalles de las probetas para el ensayo TSR

Método De Ensayo	Probeta Sin Acondicionar			Probeta Acondicionada		
	1	2	3	1	2	3
Identificación probeta						
Diámetro [mm]	150,1	149,8	150,0	150,0	150,0	149,8
Altura [mm]	63,2	62,9	63,0	62,9	63,1	63,0
% Vacíos [cm3]	6,4	6,3	6,3	6,5	6,4	6,4

La saturación se realiza con agua destilada a temperatura ambiente en una cámara de vacío. Se aplica un vacío parcial de 70 [kPa] o 525 [mmHg] durante un tiempo breve, por

5 minutos aproximadamente. El volumen de agua absorbida se obtiene restando la masa de secado al aire de la masa SSD de la muestra parcialmente saturada. El grado de saturación se obtiene dividiendo el volumen del agua absorbida por el volumen de vacíos de aire y se expresa en porcentaje (Ver tabla 6-37). Según el resultado se procede según el punto 8.6.3 de la norma ASTM D4867-09. Si es difícil alcanzar el grado mínimo de saturación requerido el agua utilizada para saturar puede calentarse hasta 60°C.

Debe ajustarse luego la temperatura del subconjunto acondicionado por humedad sumergiéndolo en un baño de agua durante 1 hora a 25° C. Se mide la altura del subconjunto con acondicionamiento de humedad y se determina el volumen.

Se determina la hinchazón de las muestras acondicionadas dividiendo el cambio en el volumen de las muestras. Los resultados se ven en la Tabla 6-37.

Tabla 6-37 Detalles del hinchamiento de las Probetas Acondicionadas

Método De Ensayo	Probeta Sin Acondicionar			Probeta Acondicionada		
	1	2	3	1	2	3
Identificación probeta						
Masa SSD [gr]	2463,4	2463,7	2466,9
Masa sumergida [gr]	1409,5	1411,2	1414,6
Volumen [cm3]	1053,9	1052,5	1052,3
Vol. Agua absorbido [cm3]	46,3	48,9	44,6
% Saturación	68,7	73,2	67,4
%Hinchamiento	1,6	1,6	1,4

Se ajusta la temperatura del subconjunto seco sumergiéndolo en un baño de agua durante 20 minutos a 25°C.

Se someten a tracción ambos subconjuntos, colocando una muestra en el aparato de carga. Se colocan las tiras de carga de forma que queden paralelas y centradas en el plano diametral vertical. La carga se aplica diametralmente a 50 mm/min hasta alcanzar la carga máxima y se registra. Continuar cargando hasta que la muestra se fracture. Romper la muestra y estimar visualmente el grado de daño por humedad, si corresponde al subconjunto. Los resultados del ensayo se muestran en la tabla 6-38.

La principal causa de pérdida de adherencia entre el agregado y el asfalto es debido a la acción del agua. El agua puede penetrar a la estructura de la mezcla cuando está presente en un agregado que recibió un mal o insuficiente secado; también cuando existen fisuras y porosidad en la carpeta; o por capilaridad cuando existe agua entre las subcapas. [17]

Un valor de TSR de 80 por ciento o mayor es considerado aceptable. Algunas agencias han elegido aceptar valores de TSR del 70 por ciento o mayores. Otras utilizan una fuerza de tensión indirecta mínima, el problema de esta medida es que una mezcla puede tener insuficiente resistencia a la tracción para resistir la deformación bajo la carga específica.

Tabla 6-38 Resultados ensayo TSR

Ensayo de susceptibilidad a la humedad	Promedio Tracción indirecta		Requerimiento Superpave Exigido %	Requerimiento EETT Exigido %
	Grupo 1	Grupo 2		
Tensión condición seca kPa	–	602,1		
Tensión condición húmeda kPa	520,4	–		
TSR Obtenido %	86,4		80,0	75,0

La mezcla de diseño presenta una buena relación para el TSR obtenido, cumpliendo con el máximo criterio para Superpave.

6.11. Rueda de carga Hamburgo

Se preparan 2 probetas de 140 [mm] de altura y 150 [mm] diámetro con un porcentaje de vacíos de aire del 7 por ciento.

Cada una es aserrada para obtener 2 pares de probetas de 60 [mm] de altura, cumpliendo el criterio del tamaño máximo del agregado en el punto 7.1.1.2 de la norma UNE-EN 12697-22:2008+A1. De ser necesario deben ser desbastadas para conseguir el espesor correspondiente y una superficie lisa y nivelada. Al colocar una regla en la superficie no debe existir una distorsión mayor a los 2 [mm]. El espesor se mide en 4 puntos difiriendo en 90° de la probeta. El valor medio de estas mediciones se registra como el espesor de la probeta. El espesor de la probeta, en los 4 puntos de la zona de medición, no debe diferir en más de 2,5 [mm] con respecto al espesor nominal.

Las probetas deben ser marcadas indicando la dirección del “tráfico”. Antes de ensayar deben mantenerse en una posición horizontal a una temperatura que no exceda los 25°C.

Se pone en marcha la máquina y se registran las deformaciones generando un perfil de deformación. Se procede hasta completar los 10.000 ciclos de carga o hasta que la deformación sea de 20 [mm].

Uno de los deterioros que afectan a la mezcla asfáltica en servicio son las deformaciones permanentes; en donde una sección transversal de la superficie ya no ocupa su posición original. Se produce generalmente por la acumulación de pequeñas deformaciones

producidas con cada aplicación de carga, transformándose en una deformación irre recuperable. Las causas principales se deben a daños por humedad, abrasión y densificación por el tráfico. Con un número dado de repeticiones de carga aparecerán las roderas; estos surcos que se forman retienen suficiente agua para provocar hidropilano o acumulación de hielo.

La prueba de Hamburgo tiene el objetivo de medir la resistencia a las roderas y al desprendimiento de la mezcla asfáltica. Además, identifica problemas de adherencia de los materiales pétreos con el asfalto y una estructura mineral deficiente. (Ver Imagen 6-17). La grafica 6-1 muestra la deformación de la probeta producto del paso de la rueda en función del número de pasadas.

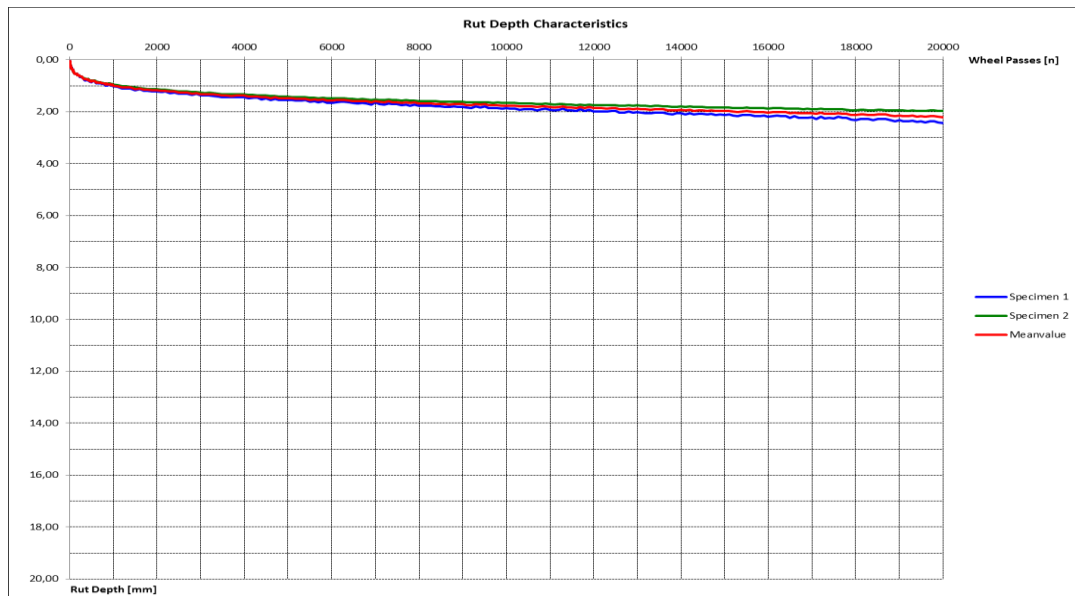


Gráfico 6-1 Deformación versus número de pasadas por la rueda de Hamburgo

El criterio de falla en la especificación por la Ciudad de Hamburgo es de 4 [mm] de deformación máxima en autopistas y 2,5 [mm] en zonas industriales. En Estados Unidos se utiliza el criterio de falla de 10 [mm] máximo para considerar una mezcla de buena calidad.

Los resultados de la deformación para las probetas de diseño se ven en la tabla 6-39.

Tabla 6-39 Resultados ensayos Rueda de Hamburgo

Muestra N°	Probeta 1	Probeta 2
N° de Ciclos de falla de la probeta	20.000	20.000
Pendiente de deformación en pista para 10.000 ciclos de carga [mm]	0,064	0,05
Pendiente media de deformación en pista en agua a 10.000 ciclos de carga [mm]	0,057	
Porcentaje de la profundidad de la rodera en agua [%], según datos a 10.000 ciclos ^(a)	3,08	2,64
Porcentaje de la profundidad media de la rodera en agua [%] , según datos a 10.000 ciclos ^(a)	2,86	
Profundidad de la rodera en agua [mm], según datos a 10.000 ciclos.	1,87	1,66
Profundidad media de la rodera en agua [mm], según datos a 10.000 ciclos.	1,77	

Ninguna probeta estuvo cerca del límite de deformación de 20 [mm]; cumpliendo con los criterios de deformación para las dos localidades mencionadas anteriormente.



Imagen 6-17 Probeta 1 sometida a las ruedas de carga por la máquina de Hamburgo



Imagen 6-18 Probeta 2 sometida a las ruedas de carga por la máquina de Hamburgo

6.12. Medición del Módulo de Rigidez mediante el ensayo de Tracción Indirecta.

Se fabrican 2 probetas de 140 mm que serán cortadas para obtener 4 probetas cilíndricas de 60 [mm] cada una. Después de serrar y antes de ensayar, las probetas se deben secar hasta masa constante en una atmósfera de aire con una humedad relativa menor del 80% y una temperatura menor de 20°C.

Deben realizarse dos marcas diametrales perpendiculares entre sí, marcando el centro de la superficie de la probeta.

El ensayo puede comenzar una vez que las probetas hayan alcanzado la temperatura requerida; en este caso a los 15 y 32°C. El equipo aplica una carga mediante pletinas a lo largo del diámetro. Aplica impulsos de carga repetidos que se alternan con periodos de descanso. Se registra la deformación y se grafican los pulsos aplicados en donde se registra la máxima carga aplicada. Esta carga se aplica en ambas direcciones diametrales para cada probeta.

Las exigencias de las especificaciones técnicas del proyecto exigen un mínimo de 4000 [MPa] para las probetas ensayadas a 15°C.

Los valores de deformación horizontal para una probeta de 150 [mm] de diámetro, deben cumplir el rango de 7 ± 2 [μm]. Además, si la deformación es menor a 3 [μm] o mayor de 20 [μm], significa que la temperatura de ensayo o el método de ensayo no son adecuados. El periodo ascendente, que es el tiempo hasta lograr la carga máxima, debe estar dentro del rango de 124 ± 4 [ms].

La variación porcentual del Módulo de Rigidez, tanto del Módulo Medido como del Módulo Ajustado, debe encontrarse en el rango de +10 % a -20 % respecto al valor registrado para el primer ensayo. Los resultados de este ensayo para las probetas de diseño se muestran en la Tabla 6-40.

Tabla 6-40 Resultados del Módulo de Rigidez para dos probetas, ensayadas a 15 y 32°C

	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
Densidad Aparente [kg/m ³]	2396		2401		2396		2401	
Temperatura de Ensayo [°C]	15,0				32,0			
Frecuencia o tiempo de carga [ms]	124,0				124,0			
Deformación Horizontal [μm]	7,0				7,0			
Deformación o desplazamiento [%]	0,0046				0,0046			
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	6283	6169	6355	7141	1431	1435	1409	1490
Módulo de Rigidez Ajustado [MPa]	6338	6228	6414	7226	1431	1417	1413	1508
Diferencia entre Módulos Ajustados medios [%]	0,8	10	-1,7	-1,1	14,0	4,0	-1,2	9,0

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se realiza una comparación de las etapas comprometidas en la metodología Superpave, evaluando los resultados obtenidos para las dos experiencias en el diseño de una mezcla asfáltica en caliente en los años 2016 y 2017. Para esto se detallan resultados e información en común entre ambos proyectos.

Selección del Agregado Mineral

Los agregados de ambos proyectos deben cumplir tanto con lo especificado en las EETT respectivas y también con los criterios Superpave.

Determinada la granulometría para cada tipo de árido, se corrobora el tamaño máximo nominal (NMAS) y se genera una pauta para confeccionar la granulometría definitiva. Las granulometrías se combinan para generar las mezclas de prueba cumpliendo con la banda de trabajo especificada.

Como primer paso, cada árido y la mezcla entre estos, deben cumplir con las exigencias para las propiedades de consenso y origen. Los resultados se ven en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1 Resultados propiedades del agregado y comparación con los criterios exigidos

	Muestras	AS-1679-1	AS-1679-2	AS-1679-3	Criterio Superpave	Requerimiento EETT
Propiedades de consenso	Angularidad del Agregado Grueso (1 o más caras)	100	100	100	80 mínimo	100 mínimo
	Angularidad del Agregado Grueso (2 o más caras)	94	99	100	75 mínimo	90 mínimo
	Angularidad del agregado fino	–	–	51	40 mínimo	–
	Partículas Lajeadas	0	0,7	0	10 máximo	8 máximo
	Equivalente de Arena	–	–	57	45 mínimo	45 mínimo
Propiedades de origen	Tenacidad	11,1	13,4	15,5	30-45 máximo	25 máximo
	Desintegración por sulfato de sodio	3,5	3,4	–	10-20 máximo	10 máximo
	Desintegración por sulfato de Magnesio	4,4	4,5	–	10-20 máximo	13 máximo
	Materiales deletéreos	0	0	0,8	0,2-10 máximo	2 máximo

- Los áridos de ambos proyectos cumplen con el criterio para la angularidad del agregado grueso, teniendo un pobre porcentaje de partículas rodadas. Éstas últimas aminoran la fricción interna de la mezcla.

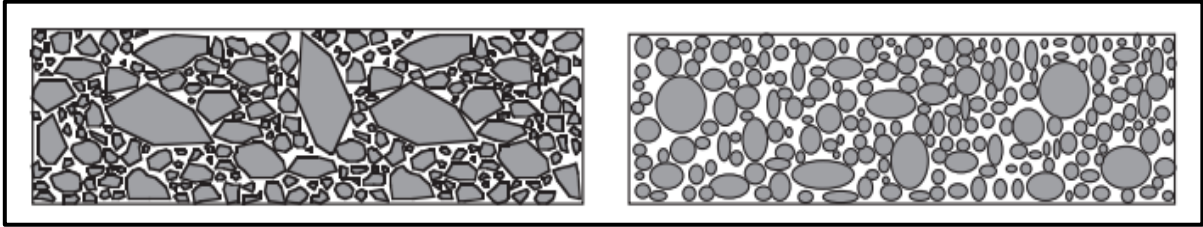


Imagen 7-1 Comparación entre partículas fracturas versus redondeadas

- La angularidad del agregado fino determina un porcentaje de vacíos de aire para un volumen determinado del árido polvo roca no compactado. Un alto porcentaje de vacíos de aire indica una mayor presencia de partículas con caras fracturadas, lo que implica mayor fricción entre partículas. Este criterio se cumple de igual forma para ambos proyectos (Ver imagen 4-1).
- Las partículas lajeadas tienen una relación de dimensión máxima con respecto a la mínima de 5:1. Estas tienen tendencia a romperse durante la construcción; además de reducir el VAM. Es necesario siempre que su porcentaje sea mínimo. Este porcentaje es ligeramente mayor para el proyecto del año 2016, pero el VAM final es mayor a la mezcla del 2017. La tendencia quiere decir que el mayor porcentaje de partículas lajeadas no influyó en el VAM final.
- El contenido de arcilla o también llamado equivalente de arena se determina con una solución de floculación que fuerza al material de arcilla a que se suspenda por encima del agregado granular. La arcilla promueve la inclusión de agua dentro de la mezcla, lo que implica enlaces débiles de asfalto a asfalto (cohesión). Este porcentaje fue mayor en el polvo roca para el proyecto del 2016, lo que indica una mayor cantidad de arena sedimentada en el ensayo, material no plástico deseable en la mezcla.
- Al medir la tenacidad del agregado se estima su resistencia a la abrasión y degradación mecánica durante el manejo del agregado, la construcción y en servicio. El ensayo mide el material perdido, cuanto mayor sea el valor, más desmenuzable será el agregado grueso y mayor será la degradación del agregado en la explotación de cantera a través del almacenamiento, fabricación de la MAC y debajo de los rodillos al ser compactada. Los resultados son similares para ambos proyectos.
- Las pruebas de solidez o desintegración por sulfatos de sodio y magnesio estiman la resistencia de los áridos a la intemperie durante el servicio. Mide la pérdida de material luego del ensayo. Al exponer el árido a repetidos ciclos de inmersión y

secado, las sales precipitan en el espacio vacío permeable del agregado, y al volver a hidratar las sales se expanden simulando las fuerzas expansivas del agua helada. La desintegración por sulfatos de magnesio tiene a ser más alta por ser un químico más agresivo. El árido del 2017 tiende a desintegrarse más que el del año anterior.

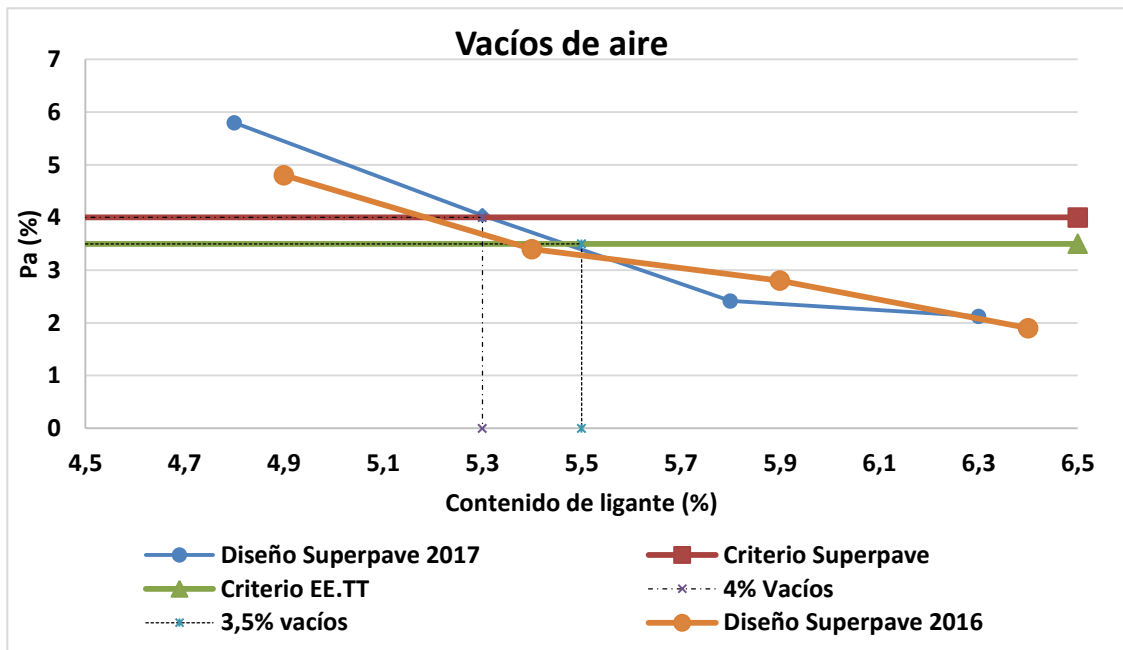
- Los materiales deletéreos son los contaminantes como grumos de arcilla, pizarra, madera, mica o carbón mineral. Existen varios criterios para especificar el porcentaje máximo de estas partículas, variando desde los 0,2 hasta el 10 por ciento, dependiendo del contaminante en específico. En ambos años este material es casi nulo.

Selección del Ligante

- En cuanto al ligante, en el año 2016 se utilizó un ligante con clasificación PG 86-22, mientras que en el 2017 se utilizó un PG 76-28. El primero posee un grado mayor de resistencia a la alta temperatura, y el segundo posee un grado mayor de resistencia a la baja temperatura. Ambos ligantes son modificados con polímeros elastoméricos, provenientes de la misma planta de la empresa OIL MALAL.

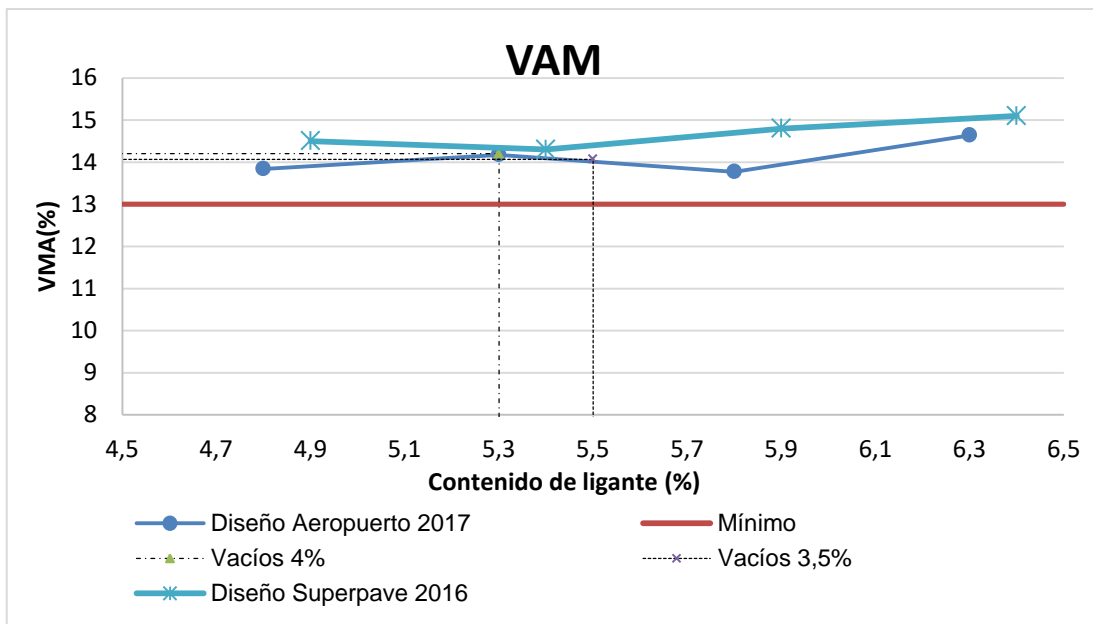
Relaciones volumétricas

- En cuanto a los vacíos de aire en el diseño volumétrico; ver gráfica 7-1. Al comparar las gráficas de los años 2016 y 2017, se aprecia que el diseño antiguo tiene una tendencia más baja de vacíos de aire en relación al contenido de ligante. Esta gráfica se construye con los datos obtenidos al seleccionar el porcentaje de ligante óptimo, en el procedimiento del diseño volumétrico. El porcentaje óptimo de ligante, a los 3,5 % de vacíos de aire, para el 2016 es 5,4 %; y para el 2017 es 5,5%.



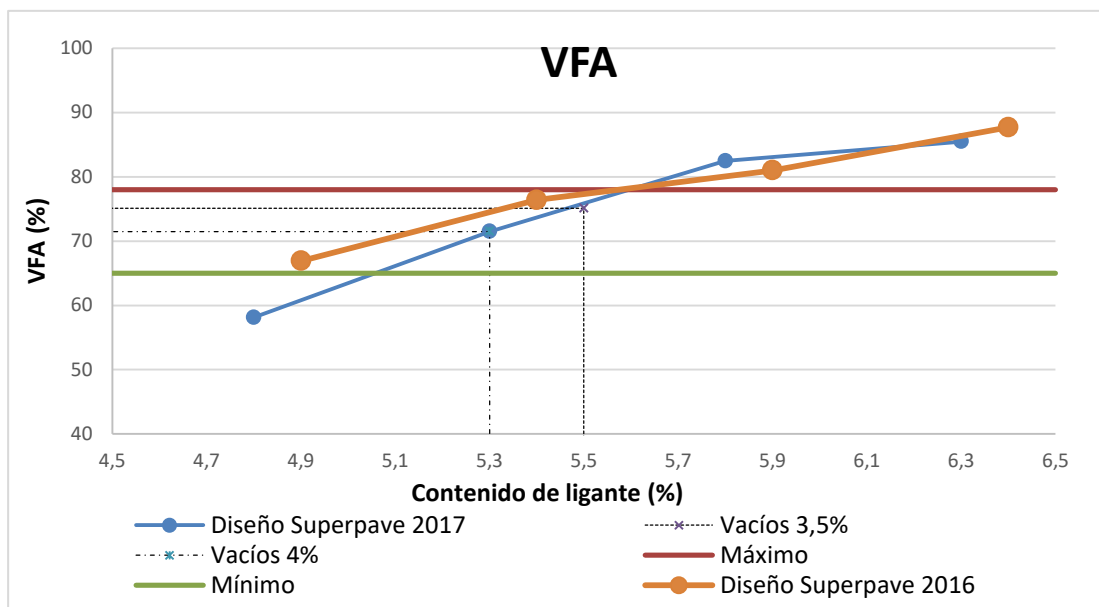
Gráfica 7-1 Relación vacíos de aire con respecto al contenido de ligante

- El VAM resultante para ambos años resultó similar, ver gráfica 7-2, variando muy poco en los porcentajes de vacíos de aire de diseño. Para el 2016 resultó en un 14,4% y el 2017 en un 14,2%. Esta similitud sirve para comparar los vacíos rellenos de asfalto en base al contenido de ligante; considerando el total del VAM como la suma de los vacíos de aire más el volumen relleno de asfalto.



Gráfica 7-2 Relación VAM con respecto al contenido de ligante

- En cuanto a los vacíos rellenos de asfalto, el diseño del año 2016 se mantiene superior hasta que se alcanza el límite máximo de 78 %, luego de este punto tiende a ser menor al diseño del año 2017.
- Al considerar el 3,5 % de vacíos de aire para el diseño como punto de comparación y tomando en cuenta que el contenido total de ligante es la suma de los vacíos rellenos de asfalto (Vbe o VFA) más el asfalto absorbido (Ver imagen 7-2); a los 3,5 por ciento de vacíos de aire, el VFA del 2016 es mayor que el año 2017, a pesar de poseer menor contenido de ligante. Esto indica que el agregado para la mezcla del 2016 absorbió menos porcentaje de ligante que el año 2017. Debido a las densidades del agregado para la estructura del año 2016 y la menor absorción de agua, podría concluirse que este material pétreo era menos poroso, lo que explicaría la menor absorción de ligante.



Gráfica 7-3 Relación VFA con respecto al contenido de ligante

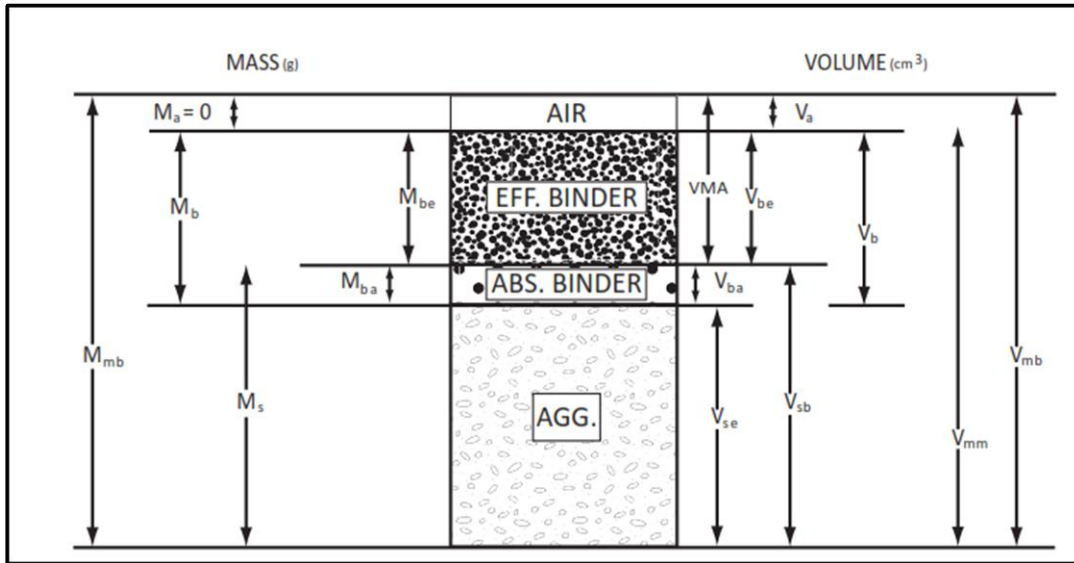
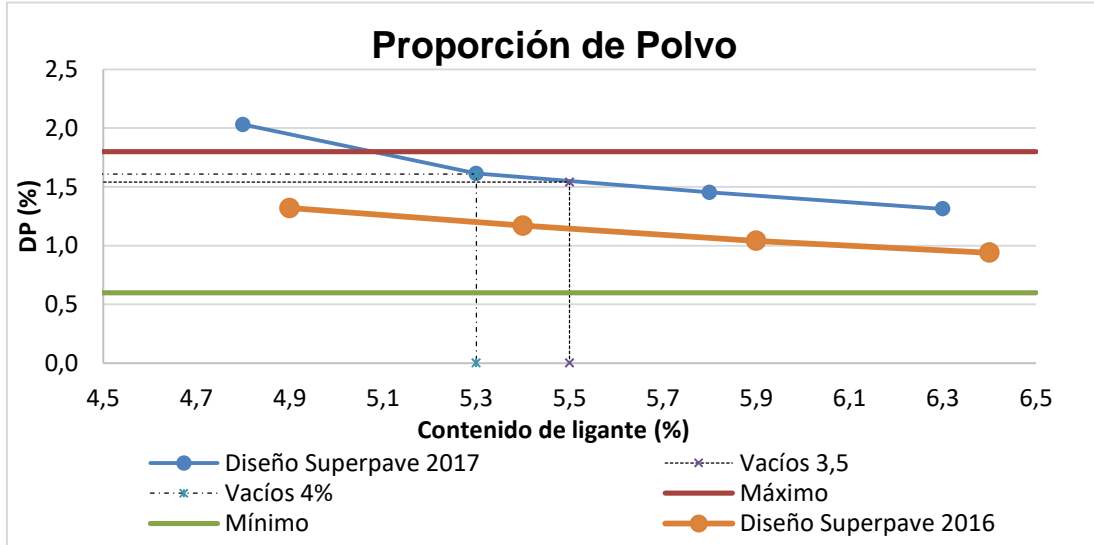


Imagen 7-2 Diagrama de fases para una mezcla asfáltica [18]

- La gráfica 7-4 muestra que la proporción de polvo para el año 2016 es menor, esto debido a la granulometría que considera menor porcentaje de material retenido en la malla N° 200, un 4,95 % a diferencia de un 7% para el año 2017.



Gráfica 7-4 Relación Proporción de polvo con respecto al contenido de ligante

8. CONCLUSIONES

En base a la experiencia en laboratorio:

En general se realiza detalladamente los procedimientos correspondientes al nivel 1 de la metodología Superpave, destinados al diseño volumétrico de una mezcla asfáltica en caliente para la conservación de pista del Aeropuerto Arturo Benitez en base a las especificaciones técnicas y otros documentos entregados para este proyecto.

Se logró formar con éxito un equipo de trabajo conformado por 4 estudiantes memoristas de la misma universidad, involucrados en diseñar la estructura de la mezcla, corroborando la calidad de los materiales utilizados y el desempeño de la mezcla una vez confeccionada. Para el diseño, se realizaron los pasos teóricos empíricos presentados por el manual norteamericano de diseño de mezclas asfáltica en caliente “MS-02 7th Edition” del instituto de asfalto. Por temas de localidad, los procedimientos son apoyados y corroborados por el Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras públicas del Gobierno de Chile (Volumen N°8). Cabe destacar que existen ciertas diferencias entre estos dos manuales; en el caso del manual de carreteras, los procedimientos de compactación son realizados con el martillo Marshall; la clasificación del ligante es por su grado de viscosidad, ocupando una nomenclatura que alude a Poises, la unidad de viscosidad dinámica; además en este manual, se especifican bandas de trabajo dependiendo del tipo de granulometría que se requiera ya sea densa, semi-densa, gruesa, abierta o fina; para cada una de estas existen ciertas denominaciones que dependen del tamaño máximo nominal. En contra parte, el MS-02 del instituto de asfalto menciona específicos puntos de control, según el tamaño máximo nominal, sin mayores clasificaciones. En el caso del método Marshall, ligado al manual de carreteras chileno, éste evalúa las probetas mediante ensayos de estabilidad y de flujo, como criterio de aceptación de la mezcla.

En relación al diseño; primero, los áridos fueron clasificados según su composición granulométrica, siendo fraccionados los tres tipos de áridos según los tamaños de sus partículas. Al tener estos datos fue posible combinarlos para dar con una banda granulométrica de trabajo estrictamente acotada por los criterios de la metodología. Además, se corrobora que los áridos sean capaces de producir una alta fricción interna con el fin de mejorar la calidad estructural del pavimento; para esto es necesario que posean, de ser posible, en su totalidad más de 1 cara fracturada y que sus partículas no

caractericen lo que se denomina como laja, ya que por su forma tenderían a fracturarse con mayor facilidad. También los áridos deben ser de buena calidad, y que posean una buena solidez y tenacidad frente a las condiciones del medio ambiente.

Se confeccionaron tres mezclas de áridos como prueba; que cumplieran con la banda de trabajo mencionada anteriormente, pero que difirieran los porcentajes de los tres tipos de árido a incorporar. Se estimaron las relaciones volumétricas utilizando, como base, las gravedades específicas adimensionales de los áridos y así elegir un porcentaje de asfalto inicial que proporcione a la mezcla asfáltica compactada una cantidad de vacíos de aire igual a 4 por ciento del volumen total.

El asfalto utilizado corresponde a un PG 76-28. Posee un grado más de resistencia a la baja temperatura que el exigido por las especificaciones técnicas (PG 76-22). Corresponde a un asfalto modificado con polímeros lo cual mejora su adherencia.

Estimadas las relaciones volumétricas iniciales, se da comienzo con las labores en el laboratorio para mezclar y compactar las probetas. Los procedimientos deben ser rigurosos para respetar los tiempos involucrados y las temperaturas que debían poseer cada material. Estos factores de ser equívocos y no respetados por los operadores, pueden arruinar el material y por ende los resultados en el laboratorio y a grandes rasgos, el desempeño en terreno. En el caso del asfalto, éste al estar por más tiempo de lo necesario sometido a altas temperaturas puede envejecerse rápidamente alterando sus propiedades reológicas. El mismo efecto en el asfalto lo puede provocar el árido caliente al juntarse ambos; si bien, el árido puede y debe alcanzar mayores temperaturas, ésta debe ser precisa para que al mezclarla con el asfalto no lo altere. Al mezclar manualmente se debe verificar el recubrimiento total de las partículas con asfalto y al momento de envejecer la mezcla se le debe otorgar el tiempo suficiente para que las partículas pétreas terminen de cubrirse y absorban por sus poros parte del asfalto.

El uso del compactador giratorio Superpave asemeja mejor las condiciones de compactación en obra en comparación al usado en el método Marshall. Además de ser más cómodo y práctico.

Con las probetas de prueba se obtienen nuevamente las relaciones volumétricas y de relevancia los vacíos de aire reales que poseen las estructuras compacta de las mezclas. Se comparan entre sí y se verifica el cumplimiento con los criterios. De este análisis se

concluye que la mezcla tres cumple con mayor eficacia los requerimientos de la metodología.

Se volvieron a confeccionar 4 probetas, todas con la estructura de agregado seleccionada, pero con 4 porcentajes distintos de contenido de asfalto; verificando así el comportamiento de la estructura con cuatro puntos de comparación para las relaciones volumétricas. El porcentaje final para diseñar la mezcla asfáltica es 5,25 por ciento de contenido de asfalto.

La metodología Superpave se basa en la teoría de que un pavimento con un 4 por ciento de vacíos posee mejores cualidades estructurales para el tráfico esperado. Para esto se considera el volumen de asfalto, áridos y aire de la estructura del pavimento. Cada uno de estos, a excepción del aire, posee propiedades y características intrínsecas que deben ser estudiadas para lograr el objetivo en la cantidad de vacíos de aire. Parte del asfalto tiene que cubrir cada partícula de agregado, y otra será absorbida por los huecos del árido; además, y como función principal, debe cohesionar toda la mezcla. El árido debe entregar una estructura resistente y de alta fricción interna para contrarrestar las tensiones producidas por las cargas de tráfico, y durante el servicio no fracturarse ni acumular agua debido a las condiciones climáticas. El agua puede ocasionar falta de cohesión y debilidad de la estructura del pavimento. También puede alojarse en la superficie del pavimento sin ser drenada alterando la experiencia del conductor.

Comparación de las mezclas asfálticas con respecto a la susceptibilidad a la humedad, en los años 2016-2017

Logrado con éxito la mezcla de diseño, cumpliendo con los criterios Superpave y las especificaciones técnicas del proyecto, se realizan los siguientes ensayos para comprobar la susceptibilidad a la humedad:

El ensayo TSR compara la resistencia de dos probetas de la misma composición, una saturada con agua y otra seca, al ser sometidas a una carga y deformarlas. Los resultados obtenidos cumplen con muy bien con la especificación de la norma, aun así el valor es menor al diseño destinado para el año 2016; un 86,4% frente a un 95% respectivamente.

Al pasar una rueda de carga varias veces sobre la superficie de una probeta aserrada, exponiendo directamente al árido, se puede corroborar la resistencia a desprenderse y

deformarse la estructura de un pavimento asimilando las sucesivas pasadas por tráfico; para esto se utiliza la rueda de Hamburgo. La probeta estando en una condición de humedad se le pasan sucesivas veces la rueda de carga. La deformación final producida fue mayor a la determinada en la mezcla del año 2016; unos 1,77 [mm] en comparación a unos 1,24 [mm] respectivamente.

Se determinó también el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica a 15°C y 32°C. Ensayo que sirvió para estimar la respuesta a las tensiones internas producidas por el tráfico. Para esto se somete una probeta a cargas cíclicas, que buscan deformar diametralmente su estructura inicial. Considerando el ensayo realizado a 15°C, el módulo de rigidez en promedio obtenido el año 2016 fue mucho mayor al del 2017; unos 8000 [MPa] frente a unos 6500 [MPa].

Conclusiones generales en relación a la experiencia del diseño con Superpave en Chile:

Las probetas en el laboratorio se compactaron hasta los $N_{máx}$; otra alternativa es compactarse al número de giros de diseño, y así determinar las densidades relativas asemejando condiciones más representativas de lo que se realizará posteriormente en terreno.

Para realizar cualquier ensayo en base a una norma, es recomendable que el operador sea siempre el mismo, para evitar la variabilidad por la forma de proceder y desenvolverse dentro de un laboratorio.

La producción y diseño en laboratorio involucra procedimientos minuciosos y/o detallados para conseguir las exigencias de la metodología y las especificaciones técnicas. Esto es difícil reproducirlo en terreno, cuando las cantidades de producción son de alto volumen; bajo estas condiciones pueden descuidarse los detalles. Complementario a lo anterior, los ensayos donde se evalúa la susceptibilidad a la humedad y los de desempeño, asemejan condiciones ambientales y cantidades de carga por tráfico una vez que el pavimento este en servicio; aun así estos ensayos no son totalmente fiables para corroborar el desempeño a futuro de la mezcla, por lo cual se hace recomendable hacer un seguimiento del pavimento durante el tiempo de servicio para recopilar información y mejorar el sistema de diseño.

Los procedimientos expuestos en esta memoria fueron replicados utilizando esta vez un material adicional, incorporado junto con el árido. El RAP equivale a una mezcla asfáltica reciclada de un pavimento estructural que fue fresado y retirado de su lugar de servicio. El uso de este material busca el ahorro en costos para materiales vírgenes de asfalto y de áridos. El uso del RAP es acotado a lo largo del país y aún no existen resultados concluyentes para el porcentaje máximo óptimo a incorporar en una mezcla asfáltica que otorgue buenas propiedades al desempeño de un pavimento. El diseño realizado para el Aeropuerto fue replicado con la incorporación de 15 y 25 por ciento de RAP; todo el trabajo se realizó por el equipo integrado por Sebastian Contreras, Macarena Rivero y Rodrigo Fernández.

Conclusiones generales en relación a la experiencia del uso de la metodología Superpave en USA:

En el área de agregados; las relaciones volumétricas de la mezcla son sensibles a los cambios en la gravedad específica, la absorción, la forma y la gradación. El aumento de las frecuencias de prueba, el ajuste de la mezcla para tener en cuenta las propiedades cambiantes y un control más estricto de las propiedades agregadas son algunas de las soluciones que se ofrecen para ayudar a lidiar con estos cambios.

Se necesitan mejores pruebas para los agregados, especialmente para las propiedades que involucran la forma y la textura; se busca reemplazar la angularidad del agregado fino y la determinación de la gravedad específica.

Las primeras mezclas Superpave eran generalmente más gruesas; ahora muchos estados están volviendo a mezclas algo más finas debido a las preocupaciones sobre la permeabilidad, la lisura y la durabilidad del pavimento.

Algunos estados están preocupados por la durabilidad de la mezcla a largo plazo, y sienten que las mezclas poseen poco ligante. Para aumentar el contenido, han cambiado los vacíos de aire de diseño, los niveles de giro (incluyendo el punto de bloqueo para redefinir el número de giros de diseño), el VAM y la gradación. También han impuesto contenidos mínimos de ligante o requisitos de espesor de película, en algunos casos.

Los estados usan diferentes niveles de giro y utilizan la calibración del ángulo interno o externo del compactador giratorio Superpave.

Un número adecuado de personal de control de calidad es absolutamente crucial para el éxito del proyecto. Además, estas personas deben tener la autoridad para hacer los cambios que sean necesarios.

Los problemas iniciales con la compactación de campo y la zona sensible se resolvieron en gran medida prestando más atención a la mezcla, variando los patrones de los rodillos, agregando o cambiando los tipos de rodillo, controlando la humedad en la mezcla y aumentando el grosor de la elevación.

9. REFERENCIAS

- [1] Anónimo, "Cueva del ingeniero civil," Design by Bamz, 2010. [Online]. Available: <http://www.cuevadelcivil.com/2010/05/ejes-equivalentes.html>.
- [2] A. Institute, "General," in *MS-2 Asphalt Mix Design Methods 7th Edition*, 2014, pp. 45-46.
- [3] I. Asphalt, "Indirect Tensile Tests," in *MS-2 Asphalt Mix Design Methods 7th Edition*, 2014, p. 114.
- [4] L. C. d. i. V. UTN-FRLP, "Valoración de la Rigidez de las mezclas asfálticas densa modificando el tipo filler y asfalto".
- [5] T. R. Board, "Practical Approaches To Hot-Mix Asphalt Mix Design and Production Quality Control Testing," 2007.
- [6] T. T. Institute, "EFFECTS OF SUPERPAVE RESTRICTED ZONE ON PERMANENT DEFORMATION," Texas, 2001.
- [7] J. P. A. Ing. Jorge Prozzi, "Método de Optimización del Número de Giros de diseño mediante desempeño relativo," Infraestructura Vial, Austin, Texas, 2007.
- [8] I. M. J. Acuña, "Consideraciones generales sobre la compactación de especímenes de mezcla asfáltica en caliente en el Compactador Giratorio Superpave," 2012.
- [9] B. L. D. D. N. E.R. Brown, "Hot Mix Asphalt Tender Zone," Nacional Center For Asphalt Technology - AUBURN UNIVERSITY, AUBURN, 2000.
- [1 Caterpillar, "Guía para la compactación de juntas longitudinales".
0]
- [1 S. S. Astete, "Metodología Superpave en Aeropuertos: Resultados de la primera
1] experiencia en Chile," Santiago, Chile, 2018.
- [1 D. d. I. DAP, "ETE N°1A: Pavimentos Bituminosos Tipo Mezcla en Planta Diseñado
2] por Superpave," 2017.
- [1 I. Asphalt, "Figure 5.6 Illustration of effective Aggregate Volume," in *MS-2 Asphalt Mix*

- 3] *Design Methods 7th Edition*, 2014, p. 114.
- [1 C. Wahr, "Diseño MAC superpave," documento PowerPoint.
4]
- [1 A. Institute, in *MS-2 Asphalt Mix Design Methods 7th Edition*, 2014, pp. 54-64.
5]
- [1 I. Asphalt, "Effect of air voids," in *MS2 Asphalt Mix Design Methods*, 2014, p. 61.
6]
- [1 A. Z. S. Rivera, "amaac," Universidad Marista de Querétaro, [Online]. Available:
7] http://www.amaac.org.mx/archivos/eventos/7cma_2011/30.pdf.
- [1 A. Institute, "Asphalt Mix Design Methods," in *Volumetric properties of compacted
8] paving mixtures*, 2014, p. 47.
- [1 D. d. i. DAP, "ETEN°_1A: PARA PAVIMENTOS BITUMINOSOS TIPO MEZCLA EN
9] PLANTA DISEÑADO POR SUPERPAVE," 2017.
- [2 A. Institute, "MS-2 Asphalt Mix Design Methods 7th Edition," 2014, pp. 65-66.
0]
- [2 L. R. V. V. Profesor, "Cargas del tránsito sobre los pavimentos de calles y carreteras,"
1] 19 02 2016. [Online]. Available:
[http://www.academia.edu/11885396/2._Cargas_del_tránsito_sobre_los_pavimentos_d
e_calles_y_carreteras](http://www.academia.edu/11885396/2._Cargas_del_tránsito_sobre_los_pavimentos_de_calles_y_carreteras).
- [2 A. Institute, "Mixing and Compaction temperatures," in *MS-2 Asphalt Mix Design
2] Methods 7th Edition*, 2014, p. 35.
- [2 I. Asphalt, "Toughness," in *MS-2 Asphalt Mix Design Methods 7th Edition*, 2014, p. 22.
3]
- [2 a. institute, "Soundness," in *MS-2 Asphalt Mix Design Methods 7th Edition*, 2014, p.
4] 23.
- [2 A. Institute, "Laboratory Compaction," in *MS-2 Asphalt Mix Design Methods 7th
5] Edition*, 2014, p. 39.
- [2 a. institute, in *MS-2 Asphalt Mix Design Methods 7th Edition*, 2014, p. 112.
6]
- [2 I. Asphalt, "Table 6.3 Superpave Gradation Requeriments," in *MS-2 Asphalt Mix
7] Design Methods 7th Edition*, 2014, p. 68.

[2 I. Asphalt, "Table 6.5 Superpave gyratory compaction effort," in *MS-2 Asphalt Mix Design Methods 7th Edition*, 2014, p. 68.

[2 I. Asphalt, "Conditioned Subset," in *MS-2 Asphalt Mix Design Methods 7th Edition*, 2014, p. 114.

[3 I. Asphalt, "Asphalt binder behavior," in *MS-2 Asphalt Mix Design Methods 7th Edition*, 2014, p. 5.

[3 I. Asphalt, "Table 6.5 Superpave Mixture Requirements," in *MS-2 Asphalt Mix Design Methods 7th Edition*, 2014, p. 70.

10. ANEXOS

10.1. Corrección gravedad específica bruta de las probetas de prueba

Tabla 10-1 Análisis del porcentaje de gravedad máxima para la mezcla 1

Mezcla de prueba 1						
N°GIROS		Proneta 1-1				
		ht[mm]	Gmb[est]	Factor de corrección	Gmb[corr]	Gmm%
Nini	7	128,6	2,042	1,04	2,126	86,1
Ndes	75	116	2,264		2,357	95,5
Nmáx	115	114,2	2,299		2,394	97,0
N°GIROS		Probeta 1-2				
		ht[mm]	Gmb[est]	Factor de corrección	Gmb[corr]	Gmm%
Nini	7	129,2	2,019	1,05	2,121	85,9
Ndes	75	116,5	2,239		2,352	95,3
Nmáx	115	114,7	2,274		2,389	96,8

Tabla 10-2 Análisis del porcentaje de gravedad máxima para la mezcla 2

Mezcla de prueba 2						
N°GIROS		Probeta 2-1				
		ht[mm]	Gmb[est]	Factor de corrección	Gmb[corr]	Gmm%
Nini	7	127	2,061	1,04	2,139	86,2
Ndes	75	114,7	2,282		2,368	95,4
Nmáx	115	112,7	2,322		2,410	97,1
N°GIROS		Probeta 2-2				
		ht[mm]	Gmb[est]	Factor de corrección	Gmb[corr]	Gmm%
Nini	7	127,4	2,067	1,04	2,152	86,7
Ndes	75	114,9	2,292		2,386	96,2
Nmáx	115	113,1	2,329		2,424	97,7

Tabla 10-3 Análisis del porcentaje de gravedad máxima para la mezcla 3

Mezcla de prueba 3						
N°GIROS		Probeta 3-1				
		ht[mm]	Gmb[est]	Factor de corrección	Gmb[corr]	Gmm%
Nini	7	125,8	2,090	1,03	2,154	86,7
Ndis	75	113,5	2,317		2,388	96,1
Nmáx	115	111,9	2,350		2,422	97,4
N°GIROS		Probeta 3-2				
		ht[mm]	Gmb[est]	Factor de corrección	Gmb[corr]	Gmm%
Nini	7	125,6	2,076	1,04	2,151	86,5
Ndis	75	113,5	2,297		2,380	95,7
Nmáx	115	111,9	2,330		2,414	97,1

10.2. Gravedades específicas teóricas máximas para las probetas de diseño con 4 porcentajes distintos de ligante.

Tabla 10-4 Gravedad específica teórica máxima para la mezcla con 5,25%

Mezcla de diseño con 5,25% de asfalto					
Muestra #1			Muestra #2		
Densidad Máxima		[gr]	Densidad Máxima		[gr]
Masa Muestra a T° Ambiente	A	2030,6	Masa Muestra a T° Ambiente	A	2011,2
Masa Recipiente lleno con Agua	D	5832,2	Masa Recipiente lleno con Agua	D	5832,2
Masa Recipiente con Agua y Muestra	E	7049,7	Masa Recipiente con Agua y Muestra	E	7039,5
Densidad del Agua a T° de Ensaye	Pt	997,1	Densidad del Agua a T° de Ensaye	Pt	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar		2490,2	Densidad Máxima Sin Compactar		2494,6
Densidad Máxima sin compactar (promedio) [gr/cm]			2,492		

Tabla 10-5 Gravedad específica teórica máxima para la mezcla con 4,75%

Mezcla de diseño con 4,75% de asfalto					
Muestra #3			Muestra #4		
Densidad Máxima		[gr]	Densidad Máxima		[gr]
Masa Muestra a T° Ambiente	A	2078,9	Masa Muestra a T° Ambiente	A	2010,5
Masa Recipiente lleno con Agua	D	5832,2	Masa Recipiente lleno con Agua	D	5832,2
Masa Recipiente con Agua y Muestra	E	7094,1	Masa Recipiente con Agua y Muestra	E	7051,0
Densidad del Agua a T° de Ensaye	Pt	997,1	Densidad del Agua a T° de Ensaye	Pt	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar		2537,3	Densidad Máxima Sin Compactar		2532,2
Densidad Máxima sin compactar (promedio) [gr/cm]			2,535		

Tabla 10-6 Gravedad específica teórica máxima para la mezcla con 5,75%

Mezcla de diseño con 5,75% de asfalto					
Muestra #5			Muestra #6		
Densidad Máxima		[gr]	Densidad Máxima		[gr]
Masa Muestra a T° Ambiente	A	2044,7	Masa Muestra a T° Ambiente	A	2003,1
Masa Recipiente lleno con Agua	D	5832,2	Masa Recipiente lleno con Agua	D	5832,2
Masa Recipiente con Agua y Muestra	E	7054,1	Masa Recipiente con Agua y Muestra	E	7027,2
Densidad del Agua a T° de Ensaye	Pt	997,1	Densidad del Agua a T° de Ensaye	Pt	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar		2477,9	Densidad Máxima Sin Compactar		2471,7
Densidad Máxima sin compactar (promedio) [gr/cm]			2,475		

Tabla 10-7 Gravedad específica teórica máxima para la mezcla con 6,25%

Mezcla de diseño con 6,25% de asfalto					
Muestra #7			Muestra #8		
Densidad Máxima		[gr]	Densidad Máxima		[gr]
Masa Muestra a T° Ambiente	A	2010,2	Masa Muestra a T° Ambiente	A	2160,7
Masa Recipiente lleno con Agua	D	5832,2	Masa Recipiente lleno con Agua	D	5832,2
Masa Recipiente con Agua y Muestra	E	7026,2	Masa Recipiente con Agua y Muestra	E	7115,8
Densidad del Agua a T° de Ensaye	Pt	997,1	Densidad del Agua a T° de Ensaye	Pt	997,1
Densidad Máxima Sin Compactar		2455,8	Densidad Máxima Sin Compactar		2456,4
Densidad Máxima sin compactar (promedio) [gr/cm]			2,456		

10.3 Corrección de la gravedad específica bruta para las probetas de diseño con 4 porcentajes distintos de ligante.

Tabla 10-8 Corrección del %Gmm para la mezcla con 5,25% de asfalto

Mezcla de diseño con 5,25% de asfalto						
N°GIROS		Proneta 1-1				
		ht[mm]	Gmb[est]	Factor de corrección	Gmb[corr]	Gmm%
Nini	7	125,3	2,094	1,03	2,162	86,8
Ndes	75	113,2	2,318		2,394	96,0
Nmáx	115	111,5	2,353		2,430	97,5
N°GIROS		Probeta 1-2				
		ht[mm]	Gmb[est]	Factor de corrección	Gmb[corr]	Gmm%
Nini	7	125,2	2,095	1,03	2,154	86,4
Ndes	75	112,9	2,323		2,388	95,8
Nmáx	115	111,2	2,359		2,425	97,3

Tabla 10-9 Corrección del %Gmm para la mezcla con 4,75% de asfalto

Mezcla de diseño con 4,75% de asfalto						
N°GIROS		Proneta 1-1				
		ht[mm]	Gmb[est]	Factor de corrección	Gmb[corr]	Gmm%
Nini	7	125,9	2,079	1,04	2,152	84,9
Ndes	75	113,9	2,298		2,379	93,9
Nmáx	115	112,3	2,330		2,413	95,2
N°GIROS		Probeta 1-2				
		ht[mm]	Gmb[est]	Factor de corrección	Gmb[corr]	Gmm%
Nini	7	126,3	2,059	1,05	2,168	85,5
Ndes	75	114,2	2,277		2,398	94,6
Nmáx	115	112,5	2,311		2,434	96,0

Tabla 10-10 Corrección del %Gmm para la mezcla con 5,75% de asfalto

Mezcla de diseño con 5,75% de asfalto						
N°GIROS		Proneta 1-1				
		ht[mm]	Gmb[est]	Factor de corrección	Gmb[corr]	Gmm%
Nini	7	122,7	2,135	1,02	2,182	88,2
Ndes	75	110,9	2,362		2,415	97,6
Nmáx	115	109,3	2,397		2,450	99,0
N°GIROS		Probeta 1-2				
		ht[mm]	Gmb[est]	Factor de corrección	Gmb[corr]	Gmm%
Nini	7	123,3	2,126	1,02	2,176	87,9
Ndes	75	111,1	2,359		2,415	97,6
Nmáx	115	109,4	2,396		2,453	99,1

Tabla 10-11 Corrección del %Gmm para la mezcla con 6,25% de asfalto

Mezcla de diseño con 6,25% de asfalto						
N°GIROS		Proneta 1-1				
		ht[mm]	Gmb[est]	Factor de corrección	Gmb[corr]	Gmm%
Nini	7	127,2	2,137	1,01	2,163	88,1
Ndes	75	114,5	2,374		2,403	97,8
Nmáx	115	112,9	2,408		2,437	99,2
N°GIROS		Probeta 1-2				
		ht[mm]	Gmb[est]	Factor de corrección	Gmb[corr]	Gmm%
Nini	7	126,6	2,152	1,01	2,169	88,3
Ndes	75	114,2	2,386		2,405	97,9
Nmáx	115	112,6	2,420		2,439	99,3

