

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZÚ
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL
MÉTODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACIÓN DE
LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN
PERMANENTE”**

ANA CLARISE JULIO BOGARIN

LIZ ANTONELA GOIRIZ MEAURIO

Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2022

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZÚ
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL
MÉTODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACIÓN DE
LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN
PERMANENTE”**

Elaborado por:

ANA CLARISE JULIO BOGARIN

LIZ ANTONELA GOIRIZ MEAURIO

Tutor:

ING. HUGO JOSÉ FLORENTÍN

Co - Tutor:

ING. ALEJANDRO QUIÑÓNEZ

Coronel Oviedo - Paraguay
Año 2022

PAGINA DE APROBACIÓN

MESA EXAMINADORA DE SUSTENTACION DE TESIS DE GRADO

Carrera de Ingeniería Civil

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL MÉTODO
MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACIÓN DE LA MEZCLA Y SU
EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Acta N°: _____

Fecha: _____

Calificación: _____

AGRADECIMIENTOS

Al buen Dios por darme la vida y la bendición de poderla vivir a plenitud.

A mi Mamá, por su acompañamiento incondicional y su legado de tenacidad y valentía para enfrentar cualquier desafío en la vida. A Victor, Enrique, Mirna, Pau y David, por estar siempre a mi lado, no dejar que decaiga y apoyarme para cumplir mis sueños.

A mi Papá y mis abuelos que, aunque estén en el cielo, siguen muy cerca de mí.

A mis compañeros, amigos y colegas de la familia laboral y universitaria que con cada aliento y apoyo hicieron posible el logro de este gran sueño.

A mi amigo y compañero de laboratorio Carlitos por motivarme, darme apoyo incondicional y ayudarnos en este trabajo de investigación.

A los Ingenieros Hugo Florentín, Fernando Molinas y Alejandro Quiñónez, quienes nos brindaron sus conocimientos y fueron parte de nuestra formación durante todo este trabajo.

Finalmente, agradecer al Laboratorio Strata y al Laboratorio CDTV donde pudimos realizar este trabajo de investigación, a los ingenieros por brindarnos su espacio de trabajo durante los meses de desarrollo de la tesis y a sus integrantes por ayudarnos en las prácticas. También al Consorcio CONTEC, especialmente a los personales de laboratorio por la buena predisposición, por proveernos los materiales y la ayuda en algunos ensayos necesarios para realizar este trabajo.

Liz Antonela Goiriz Meaurio

Agradezco a Dios por guiarme en todo el trayecto de la carrera y protegerme siempre.

Agradezco a mis padres, por haberme acompañado, apoyado y creído en mí durante este largo trayecto, sin su cariño y apoyo hoy no estaría llegando aquí, este logro se lo dedico a ellos. A mis hermanos, gracias por apoyarme en este trayecto de muchas luchas buenas y malas que se presentan en este camino y nunca dejar que decaiga.

A Liz, mi compañera de tesis, de trabajo, estudio y amiga, gracias por haber recorrido conmigo este largo camino, por todos esos momentos de altos y bajos que tuvimos que pasar para llegar en donde estamos hoy, por tu apoyo y paciencia.

Gracias a mis compañeros, principalmente a Delia Cárdenas y Diana Monges que hicieron el paso por la facultad más llevadero.

Gracias a nuestro amigo y compañero de laboratorio Carlitos por su apoyo incondicional y por la paciencia.

A nuestro tutor el Ing. Hugo Florentín y en especial agradecimiento al Ing. Fernando Molinas y el Ing. Alejandro Quiñónez y el profe Ottaviano quienes nos permitieron hacer estos estudios de investigación brindándonos sus conocimientos, y por inspirarnos a ser mejores tanto en lo personal como en lo profesional.

Finalmente, gracias a todas las entidades, el Centro Tecnológico de Desarrollo Vial, el Laboratorio Strata, que con mucha predisposición nos brindaron un espacio de trabajo para poder desarrollar esta tesis. También al Consorcio CONTEC, especialmente a los personales de laboratorio por la buena predisposición, por proveernos los materiales y la ayuda en algunos ensayos necesarios para realizar este trabajo.

Ana Julio

RESUMEN

El diseño de una mezcla asfáltica se realiza mediante métodos empíricos, lo que implica que las experiencias en campo conlleven a la necesidad de determinar si los procedimientos realizados en laboratorio se correlacionan con el desempeño del pavimento.

La compactación de mezclas asfálticas es un factor importante en el diseño, esta ha ido evolucionando en el tiempo. Existen dos métodos de compactación, una mediante el Martillo Marshall y la otra, que será objeto de estudio, se trata de una compactación por amasado, mediante el compactador giratorio, el cual es un equipo que permite simular la compactación que se realiza con un rodillo en el sitio de la pavimentación. La práctica actual de diseño de mezclas asfálticas en caliente (HMA) se encuentra en una etapa de redefinición en nuestro país, por ende, es importante realizar una comparación de ambos métodos, una con el martillo de compactación tradicional Marshall, que es el más utilizado para el diseño de mezclas y el método de compactación giratoria.

En este trabajo se evalúa los métodos de compactación de las mezclas asfálticas, como también el desempeño que la mezcla pueda tener ante las cargas inducidas por el tráfico, que se evalúa mediante el ensayo de Wheel tracking test, un equipo que simula el efecto del tránsito sobre el pavimento, midiendo las deformaciones (ahuellamientos) que sufre la mezcla asfáltica. Estos ensayos nos permitirán conocer qué alternativas de solución utilizar, con el fin de mejorar el desempeño que tendrían las mezclas asfálticas diseñadas.

PALABRAS CLAVE:

- Compactador Giratorio
- Mezclas Asfálticas en caliente (MAC)
- Wheel Tracking Test
- Ahuellamiento
- Marshall

ABSTRACT:

The design of an asphalt mix is done by empirical methods, which implies that field experiences lead to the need to determine if the procedures performed in the laboratory correlate with pavement performance.

The compaction of asphalt mixtures is an important factor in the design, where it has evolved over time, there are two methods of compaction, one using the Marshall Hammer and the other, which will be the subject of study, is a compaction by kneading, using the gyratory compactor, which is a device that simulates the compaction that is performed with a roller at the paving site, the current practice of hot mix asphalt (HMA) design is in a redefinition stage in our country, therefore, it is important to make a comparison of both methods, one with the traditional Marshall compaction hammer, which is the most used for mix design, and the gyratory compaction method.

This work evaluates the compaction methods of asphalt mixtures, as well as the performance of the mixture under traffic-induced loads, which is evaluated by means of the Wheel tracking test, an equipment that simulates the effect of traffic on the pavement, measuring the deformations (rutting) suffered by the asphalt mixture. These tests will allow us to know which alternative solutions to use in order to improve the performance of the asphalt mixes designed.

KEY WORDS:

- Gyratory Compactor
- Hot Mix Asphalt (MAC)
- Wheel Tracking Test
- Rutting
- Marshall

ÍNDICE

Capítulo I.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivos generales	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Planteamiento del problema	2
1.4 Justificación	3
1.5 Alcance	3
1.6 Metodología	4
Capítulo II.....	5
2.1 Carretera.....	5
2.1.1. Pavimento	5
2.2 Mezclas asfálticas	6
2.3 Agregados pétreos.....	9
2.3.1 Tipos de agregados pétreos según su naturaleza	10
2.3.2 Clasificación y características del agregado pétreo de acuerdo con su tamaño..	10
2.3.3. Caracterización de los áridos.....	11
2.3.4. Índice de lajas	14
2.3.5 Resistencia al desprendimiento	22
2.3.6 Comportamiento del agregado mineral.....	23

2.4 Ligante asfáltico	25
2.4.1. Propiedades de los ligantes asfálticos	26
2.4.2 Comportamiento reológico del ligante asfáltico.....	34
2.5 Mezclas asfálticas	38
2.5.1. Tipos de mezclas asfálticas	38
2.5.2. Método marshall.....	39
2.5.3. Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica	40
2.6 Componentes de una mezcla asfáltica compactada.....	44
2.6.1 Diagrama de fases	44
2.6.2 Gravedades específicas.....	47
2.6.3 Metodo superpave	53
2.6.4. Wheel tracking test.....	58
Capítulo III.....	64
3.1. Consideraciones y variables del proyecto.....	64
3.2. Materiales	64
3.2.1. Agregados.....	64
3.2.2. Cemento asfáltico	68
3.3 Diseño de la mezcla.....	70
3.3.1 Dosificación.....	70
3.3.2 Curva granulométrica de la combinación de agregados	74
3.3.3 Método marshall.....	76

3.3.4 Ensayo lottman modificado	92
3.3.5 Compactación giratoria	93
3.3.6 Preparación y compactación de muestras de mezclas asfálticas en caliente por medio del compactador giratorio.....	94
3.3.7 Equipo y herramientas	94
3.3.7 Método de prueba	95
3.3.8 Wheel tracking test.....	104
Capítulo IV	120
4.1. Resultados verificación del diseño de mezclas método marshall	121
4.1.1. Verificación de los criterios de diseño	121
4.2 Resultados de la compactación giratoria.....	128
4.2.1 Resultados de la determinación de masas para compactación.....	128
4.2.2 Resultados de la compactación.....	130
4.2.3 Comparativa de resultados de las mezclas.....	136
4.3 Resultados wheel tracking test.....	138
4.3.1 Resultados de la determinación de masas para compactación.....	138
4.3.2 Propiedades de las probetas compactadas	139
Capítulo V	148
5.1. Conclusiones.....	148
5.1.1 En cuanto a los agregados gruesos y finos.....	148
5.1.2 En cuanto al ligante asfáltico.....	148

5.2 Recomendaciones	150
5.2.1 Comparación desde el punto de vista técnico – económico, los resultados obtenidos.	

151

Bibliografía	152
Anexos	155
1. Agregados pétreo.....	155
1.1. Coeficiente de desgaste de los ángeles.....	155
1.2. Plasticidad de la fracción que pasa el tamiz 425 μm	156
1.3. Relación vía seca – vía humedad de la fracción que pasa el tamiz iram 75 μm . agregados gruesos e intermedios.....	157
1.4. Gravedades específicas y absorción del agregado pétreo de los agregados gruesos, intermedios, finos y filler.....	159
1.5. Durabilidad por ataque de sulfatos de sodio	160
1.6 índice de lajas y elongación	161
1.7 Micro deval.....	162
1.8 Polvo adherido	163
1.9 Cubicidad	165
1.10 Adherencia ligante y agregado.....	165
1.11 Caras fracturadas.....	166
1.12 Equivalente de arena	167
1.13 Concentración crítica.....	167
2. Cemento asfáltico.....	168
2.1 Penetración a 25°C	168
2.2 Punto de inflamación y fulgor	169
2.3 Punto de ablandamiento	169

2.4 Viscosidad rotacional brookfield a 135°C, 155°C, 170°C y 190°C.....	170
2.5 Peso específico	170
2.6 Ensayo de la mancha.....	171
2.7 Ductilidad a 25°C	171
2.8 Recuperación elástica torsional a 25°C	171
2.9 Variación de masa %	172

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Carretera Ruta Transchaco.....	5
Figura 2: Estratigrafía de un pavimento	6
Figura 3 - Contenido de Vacíos en la Mezcla	7
Figura 4 - Curvas Granulométricas de diferentes mezclas en caliente.	9
Figura 5 – Agregados.....	10
Figura 6 -Tamizado en laboratorio.	11
Figura 7 - (a) Proporciones Volumétricas del agregado. Fuente: Instituto Chileno del asfalto, ICA año 1992. (b) Peso Específico del agregado grueso y (c) fino en Strata....	12
Figura 8 - (a) Efecto de la forma de agregado en el VAM [5].....	13
Figura 9 - (b) Forma de las Partículas de Agregado Pétreo Fuente: Padilla (2004)	13
Figura 10 - Calibre para determinar el Índice de Lajas.	14
Figura 11 - Calibre para la Determinación del Índice de Agujas	15
Figura 12 - (a) Maquina de desgaste de los ángeles. Fuente: Padilla (2004), (b) Maquina de Microdeval.	16
Figura 13 - (a) Maquina de Pulimiento acelerado, (b) Macrotextura del agregado.	17
Figura 14 - Influencia de la textura y la velocidad	17
Figura 15 - (a)Parche de Arena, (b) Péndulo TRRL.....	18
Figura 16 - Equivalente de arena.	19
Figura 17 - (a)Ensayo de concentración crítica de la Cal (b) Ensayo de concentración crítica del pasante Tamiz N° 200.....	22
Figura 18 - Comportamiento del agregado sometido a carga de corte.	24
Figura 19 - Comportamiento de los agregados en las pilas de acopio.....	24
Figura 20 - lleno de asfalto, laboratorio Contec.	26

Figura 21 - Penetración del ligante.	26
Figura 22 - Ensayo de anillo y bola.	27
Figura 23 - Viscosímetro rotacional Brookfield.....	28
Figura 24 - Ensayo de ductilidad del Cemento asfáltico, Laboratorio Fiuna	29
Figura 25 -Ensayo de Copa Abierta de Cleveland.	30
Figura 26 - Aparato de Filtración.....	31
Figura 27 - Aparato Fraass.	32
Figura 28 - Horno rotatorio de película delgada (RTFO).....	33
Figura 29 - Adherencia Ligante - Agregado	34
Figura 30 - Modelo reológico del comportamiento de materiales viscoelásticos.....	35
Figura 31 - Reómetro de Corte Dinámico, Laboratorio Strata.....	35
Figura 32 - Rigidez del ligante asfáltico y ángulo de fase.	36
Figura 33 - Cambio de la rigidez del ligante asfáltico debido a la temperatura.	37
Figura 34 - Propiedades del ligante en función de la temperatura.....	38
Figura 35 - Mezclas Asfálticas en caliente.....	42
Figura 36 - Ilustración del VAM en una Probeta de Mezcla Compactada.	42
Figura 37 - Diagrama esquemático de fases de una mezcla asfáltica compactada.....	45
Figura 38 - Ilustración del volumen de aire, volumen de asfalto efectivo y volumen de asfalto absorbido en una mezcla asfáltica compactada.....	47
Figura 39 - Gravedad específica neta del agregado.	49
Figura 40 - Gravedad específica aparente del agregado.....	50
Figura 41 - Gravedad específica efectiva del agregado.....	51
Figura 42 - Esquema del funcionamiento del compactador giratorio	54
Figura 43 - Compactador Giratorio.....	54

Figura 44 - Comportamiento de la compactación con relación al número de giros, Laboratorio Strata	55
Figura 45 - Número de giros de compactación que se utiliza de acuerdo con los Ejes Equivalentes.	56
Figura 46 - Criterio de Diseño Superpave.....	57
Figura 47 - Desarrollo de las deformaciones permanentes en función del número de cargas	59
Figura 48 - Equipo de Wheel Tracking Test y detalles de la configuración para cada metodología.	61
Figura 49 - Fase de quiebre del bloque del granito/diorito.	65
Figura 50 - (a) Secado del Material Pétreo. (b) Cuarteado del agregado Pétreo. (c) Agregados colocados en bandejas, Laboratorio Strata.....	77
Figura 51 - (a) Gravedad Específica del agregado grueso e intermedio. (b) Gravedad Específica del agregado fino. (c) Tamizado de agregados, Laboratorio Strata.....	88
Figura 52 - a) Calentamiento del CAP AM3, b) Áridos para las probetas Marshall, c) Proceso de Mezclado, d) Moldeo de probetas, e) Martillo Marshall, f) Probetas Marshall.	89
Figura 53 - (a) Peso seco, (b) Peso en agua, (c) Peso saturado superficialmente seco	90
Figura 54 - (a) Probetas sumergidas en el baño maría, (b) rotura de probeta, (c) Curva Estabilidad – Fluencia	91
Figura 55 - (a) Mezcla Cuarteada y desmenuzado, (b) Picnómetro más material más agua, (c) Agitado del material	92
Figura 56 - Requisitos del ensayo Lottman Modificado para la dosificación de mezclas	93

Figura 57 - Maquina para el ensayo de Lottman.....	93
Figura 58 - (a) Compactador Giratorio Superpave, (b) Mezclador Bitumix – Laboratorio Strata	95
Figura 59 - (a) Agregados pétreos a introducir en el horno. (b) Asfalto colocado en el horno.....	100
Figura 60 - (a) Colocación de agregados pétreos en la mezcladora, (b) Mezclado	100
Figura 61 - Muestra lista para compactar.....	101
Figura 62 - (a) Muestra Compactada, (b) Muestra a enfriar para luego ser procesada	104
Figura 63 - Molde para compactación.....	106
Figura 64 - Compactador con la muestra en su interior.	107
Figura 65 - Maquina de Wheel Tracking Test.	108
Figura 66 - (a) Áridos para la mezcla, (b) Proceso de mezclado	115
Figura 67 - (a) Aceitado del molde, (b) Mezcla en el molde	116
Figura 68 - (a) Compactador placa con cámara de calor, (b)Muestra compactada	117
Figura 69 - Masa Saturada	118
Figura 70 - Paquete estructural de un pavimento.	120
Figura 71 - (a) Gráficos resultantes del WTT de la probeta M1 con 5.51% de cap.....	141
Figura 72 - (b) Gráficos resultantes del WTT de la probeta M2 con 5.51% de cap.....	142
Figura 73 - (a) Gráficos resultantes del WTT de la probeta M1 con 5.4% de cap.....	144
Figura 74 - (b) Gráficos resultantes del WTT de la probeta M2 con 5.4% de cap.....	145

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 INTRODUCCIÓN

El procedimiento de diseño de mezclas asfálticas en caliente se ha ido analizando al pasar de los tiempos, estos cambios se dieron tanto en los procedimientos de elaboración de la mezcla asfáltica, como en la evaluación de su desempeño. Podemos agregar que la calidad de los cementos asfálticos no es la misma debido a los nuevos materiales que se incorporan para mejorar sus propiedades, el comportamiento del clima es mucho más intenso en diferentes zonas del país, por lo que el control de calidad en la construcción de carreteras es uno de los pilares para la duración del patrimonio vial.

La metodología tradicional más utilizada para realizar dosificaciones de mezclas asfálticas es el Método Marshall o Hveem. Actualmente existen otros procedimientos de diseños de mezclas que se vienen utilizando, es el caso de la metodología Superpave, que en nuestro país se encuentra en etapa de estudio. El método consiste en estimar el contenido de cemento asfáltico óptimo a través del volumen de vacíos y de una granulometría conocida. Este método conserva los elementos de diseño volumétrico del Marshall, se diferencia de los otros por su técnica de compactación en laboratorio, ya que Marshall realiza una compactación por impacto (Martillo Marshall), mientras que en el otro método la compactación es realizada por amasado, mediante el compactador giratorio, el cual simula una mejor densificación del tránsito.

Generalmente cuando se analiza el efecto de compactación, se evalúan las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica en laboratorio mediante una serie de parámetros, tales como, el porcentaje de vacíos y el acomodo de las partículas. En ese sentido, este trabajo final de grado pretende conocer los avances que permitan mejorar la vida útil y la calidad del pavimento asfáltico, utilizando el método de compactación giratorio por el cual se estaría evaluando no solo la estabilidad y el flujo, sino también el desempeño que la mezcla pueda tener bajo diferentes sollicitaciones y condiciones de falla.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVOS GENERALES

Diseñar una mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado con polímeros a partir del método Marshall, para evaluar su comportamiento mecánico variando el método de compactación y midiendo la deformación permanente.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar áridos y ligante asfáltico a partir de sus propiedades físicas y reológicas respectivamente.
- Realizar un diseño de mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado con polímeros, a partir del método Marshall y determinar los parámetros volumétricos teniendo en cuenta las exigencias de los áridos y especificaciones de mezcla asfáltica en caliente, de acuerdo con lo especificado en el Manual de Carreteras del Paraguay – Revisión 2019.
- Determinar en laboratorio la densificación que ocurre en el campo, de manera a exhibir un mejor comportamiento en condiciones de tránsito y clima, mediante el compactador giratorio.
- Evaluar a partir del Ensayo de Wheel Tracking Test, la deformación permanente de las mezclas asfálticas en caliente del estudio.
- Comparar desde el punto de vista técnico – económico, los resultados obtenidos.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los factores que afectan a un pavimento asfáltico, es el incremento en el volumen del tránsito y de las cargas impuestas por éste, exigiendo mezclas que cumplan con la vida útil para la cual fue diseñada, que sean cada vez más durables y que conlleven a un mejor desempeño. A menudo, la práctica actual del diseño de mezclas asfálticas sólo se limita a determinar el contenido de asfalto en la mezcla, sin embargo, a este hecho le debe preceder una serie de análisis en donde se tomen en cuenta todas las variables que van a influir directamente en su comportamiento.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

El procedimiento realizado, consiste en la caracterización de los agregados, y del cemento asfáltico, diseño de la mezcla por el Método Marshall, comparando el método de compactación, mediante el compactador giratorio Superpave, y sometiendo la mezcla al ahuellamiento mediante el ensayo de deformación permanente (Wheel Tracking Test).

El Compactador Giratorio, es un equipo que permite evaluar el desempeño de la mezcla elaborada. Consiste en preparar en el laboratorio especímenes cilíndricos, para que luego sean ensayados, por medio de compactación por amasado, es decir, este método simula la densificación de la mezcla en el campo, mediante el rodillo liso, mientras que el Wheel Tracking Test es un ensayo que se realiza para, verificar la mezcla con criterios de deformación permanente y susceptibilidad al daño por humedad.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Actualmente en nuestro país el Ministerio de Obras Públicas, realiza grandes inversiones en el sector vial, con el fin de mejorar las condiciones de transitabilidad y los niveles de accesibilidad en sus respectivas áreas de influencia, a la vez que se conserva el patrimonio vial, por lo que es necesario realizar investigaciones para mejorar la vida útil de los pavimentos.

Como muchos países van actualizando sus exigencias en cuanto a la elaboración de la mezcla asfáltica, así como también el control de calidad en campo, es fundamental que el Paraguay también siga ese camino elevando sus niveles de optimización de costos a corto y largo plazo y poder ofrecer el confort esperado al usuario.

La premisa de este trabajo final de grado está enfocada en comparar la compactación de las mezclas asfálticas por el método Marshall y por el Compactador Giratorio Superpave, donde se vea cual es la que mejor simula su comportamiento en el campo, con lo cual se pretende aportar un complemento para los diseños de mezclas asfálticas, utilizando nuevas tecnologías.

1.5 ALCANCE

Caracterizar experimentalmente el comportamiento de mezclas bituminosas en caliente con asfalto modificado con polímero tipo AM3 CAP 50/70, evaluando su comportamiento

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

mecánico, variando el método de compactación. Los áridos utilizados pertenecen a la cantera del Consorcio CONTEC con granulometrías de 4^a, 5^a y 6^a tratándose de una granulometría densa continua, cuyo aporte se determinará mediante ensayos volumétricos.

1.6 METODOLOGÍA

Inicialmente se realizarán revisiones bibliográficas de todo lo referente a Mezclas Asfálticas en caliente, sobre el diseño de mezclas asfálticas por el Método Marshall, el Compactador Giratorio Superpave y el Wheel Tracking Test.

Seguidamente se realizará la etapa experimental, donde se recolectarán las muestras de agregados para la realización de los ensayos de la cantera Consorcio CONTEC situada en la ciudad de Caapucú en el Departamento de Paraguarí y el asfalto modificado con polímero tipo Am3, 50/70 procedente de Aldia ubicada en la ciudad de Itauguá. Se desarrollarán las siguientes actividades en el laboratorio:

- Caracterización de los Agregados Pétreos
- Caracterización del Cemento Asfáltico
- Diseño de mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall ASTM D 6926 y D 6927.
- Preparación y compactación de especímenes por medio del compactador giratorio, utilizando equipos del Laboratorio Strata Ingeniería ubicado en la ciudad de San Lorenzo.
- Ensayo de Wheel Tracking Test, utilizando los equipos del Centro de Desarrollo de Tecnología Vial habilitado por el MOPC con el apoyo de la KOIKA
- Análisis e interpretación de los resultados obtenidos del ensayo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Este capítulo comienza primeramente con la revisión bibliográfica sobre las mezclas asfálticas en caliente, sus propiedades físicas y volumétricas, estudio del método del diseño Marshall, variando el método de compactación, y finalmente evaluando su comportamiento frente a la deformación permanente mediante el ensayo de Wheel Tracking Test.

2.1 CARRETERA

Una Carretera, es toda infraestructura condicionada dentro del derecho de vía o franja de dominio público, incluyendo el área adicional requerida para taludes, con el propósito de permitir la circulación de vehículos de manera continua en el espacio y en el tiempo, con los niveles adecuados de seguridad y confort, como se observa en la Figura 1



Figura 1: Carretera Ruta Transchaco.

Fuente: (Galería MOPC, 2022) [1]

2.1.1. PAVIMENTO

Un pavimento constituye la superestructura del camino, está compuesto por un conjunto de capas superpuestas de forma horizontal. Por lo general está conformada por capas de sub - base, base y capa de rodadura, pudiendo ser ésta última de, concreto de cemento portland, tratamientos superficiales u otros. La estructura de un pavimento puede también ser mixta, diseñadas adoptando un modelo de construcción

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

que considera materiales apropiados y correctamente compactados como se observa en la Figura 2.

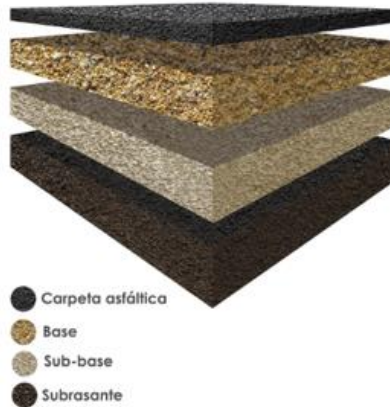


Figura 2: Estratigrafía de un pavimento

Fuente: Loria, G., Pavimento Flexible, presentación, 2017. [2]

2.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Una mezcla asfáltica está constituida básicamente de una combinación, en proporciones preestablecidas, de agregados pétreos de diferentes granulometrías, un material asfáltico y, eventualmente, aditivos, donde todas las partículas de agregado están recubiertas con una película continua y homogénea de cemento asfáltico.

Requerimientos de una mezcla asfáltica:

1. Suficiente cemento asfáltico como para asegurar la durabilidad del pavimento.
2. Suficientes vacíos de aire de acuerdo los límites normativos, como se observa en la Figura 3.
 - Límite superior para prevenir la desintegración o desnudamiento de la capa
 - Límite Inferior para dar espacio a la densificación producida por el tránsito para no generar inestabilidad y ahuellamiento.
3. Suficiente trabajabilidad, para prevenir segregaciones durante la elaboración y la colocación de la mezcla.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

4. Tener flexibilidad para acomodarse ante la presencia de asentamientos y movimientos admisibles de las capas inferiores.



Figura 3 - Contenido de Vacíos en la Mezcla

Fuente: G. Thenoux, Diseño Marshall. [3]

2.2.1. Clasificación de Mezclas asfálticas

La mezcla asfáltica se clasifica según:

1. Su modo de Fabricación:
 - Mezclas en Caliente
 - Mezclas en Frío
2. Su Granulometría:
 - Mezclas Asfálticas Densas
 - Mezclas Asfálticas Abiertas
 - Mezclas Asfálticas Discontinuas

2.2.2. Mezcla asfáltica en caliente

Este tipo de mezclas se producen en caliente en una planta asfáltica, pudiendo ser estacionaria o móvil, contando con el equipamiento necesario para calentar los materiales que componen la mezcla. [4]

2.2.3. Mezcla asfáltica en frío

Este tipo de mezclas se producen en frío en una planta asfáltica, son elaboradas en frío, en una planta móvil, utilizándose emulsiones asfálticas o asfaltos y materiales

pétreos. [4]

2.2.4. Mezcla asfáltica de granulometría densa

Las mezclas asfálticas en caliente son de granulometría continua, discontinua y homogénea, elaborada con material asfáltico y agregados pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre 37.5 mm (1 ½") y 9.5 mm (3/8"). En el caso de mezclas en frío son uniformes y homogéneas, son elaboradas con emulsión asfáltica o asfalto y agregados pétreos, con tamaño nominal entre 37.5 mm (1 ½") y 9.5 mm (3/8"). La estructura mineral posee pocos vacíos debido a la variación granulométrica. Los agregados pétreos más pequeños llenan los vacíos de los agregados más grandes. [5]

2.2.5. Mezcla asfáltica de granulometría abierta

Es mezcla en caliente, de granulometría uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, con un tamaño nominal entre 12.5 mm (1/2") y 6.3 mm (1/4").

2.2.6. Mezcla asfáltica de granulometría discontinua

Se trata de una mezcla asfáltica de composición granulométrica uniforme y homogénea, los agregados pétreos son de granulometría discontinua, con tamaño nominal 19.0 mm (3/4") y 9.5 mm (3/8"), posee una granulometría con granos de dimensiones más grandes en cantidad dominante, completada por agregados finos. La curva granulométrica es discontinua en algunos tamices. En la Figura 4, se observa las distintas curvas granulométricas.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

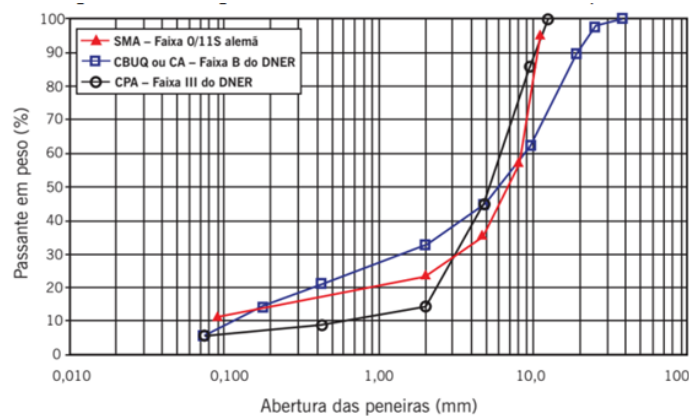


Figura 4 - Curvas Granulométricas de diferentes mezclas en caliente.

Fuente: Bernucci et al.,2008 [6]

2.3 AGREGADOS PÉTREOS

Son materiales obtenidos de la piedra para la construcción de carreteras, con o sin adición de elementos reactivos y con granulometría suficiente. Los agregados de piedra constituyen del 88 % al 96 % de la mezcla asfáltica en masa y más del 75 % de la mezcla asfáltica en volumen. Dentro de las mezclas asfálticas, son los encargados de soportar las cargas impuestas por tránsito y transmitirla en menores proporciones a las capas subyacentes.

El desarrollo de mecanismos de falla de la mezcla asfáltica tales como formación de ahuellamientos, fatiga, agrietamiento y daño por humedad depende en gran medida de la calidad de estos materiales. [7]. Figura 5

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



Figura 5 – Agregados

2.3.1 TIPOS DE AGREGADOS PÉTREOS SEGÚN SU NATURALEZA

De acuerdo con Padilla [8], el tipo de agregado pétreo se puede determinar, de acuerdo con la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, se pueden clasificar en los siguientes tipos de acuerdo con la siguiente Tabla 1

Tabla 1 - Tipos de Agregados según su procedencia

Agregados Naturales	Son aquellos que se utilizan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final.
Agregados de Trituración	Son aquellos agregados que pasan por un proceso de trituración pudiendo ser diferente clasificación ya sean rocas de cantera o de rechazo de los agregados naturales.
Agregados Artificiales	Son productos que se obtienen mediante procesos industriales, como escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y también pudiendo ser reciclables.

2.3.2 CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO PÉTREO DE ACUERDO CON SU TAMAÑO.

La Clasificación y características del agregado pétreo de acuerdo con su tamaño se clasifican mostrados en la Tabla 2

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Tabla 2 Clasificación del agregado pétreo de acuerdo con su tamaño

Agregado Grueso	Agregado Fino
Se define el agregado grueso como el material que es retenido en el tamiz 4.75 mm (N°4), proveniente de la desintegración natural o mecánica de las rocas y que cumple con los límites establecidos en la norma ASTM C - 33.	Se define como aquel agregado que es proveniente de la desintegración natural o artificial de las rocas, el cual pasa por el tamiz (9.5mm) 3/8" y que cumple con los límites establecidos en la norma ASTM C - 33.

2.3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS.

Las principales características que se deben tener en cuenta para la selección de los agregados en la construcción de pavimentos asfálticos son las siguientes:

2.3.3.1 GRANULOMETRÍA

La granulometría de los áridos es una de las características más importantes del conjunto de partículas, ya que ésta influye tanto en la resistencia mecánica de la mezcla asfáltica, como también en el contenido de vacíos y en la trabajabilidad de esta. El análisis del tamaño de las partículas se lleva a cabo mediante tamizado en seco o en húmedo, como menciona Padilla [8] en su estudio, el tamaño máximo de los agregados está limitado por factores relacionados con el espesor de la capa extendida, procesabilidad, segregación, como se muestra en la Figura 6



Figura 6 -Tamizado en laboratorio.

Fuente: (Elaboración Propia)

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.3.3.2 PESO ESPECÍFICO

El peso específico del agregado pétreo es la razón entre el peso de un volumen dado y el peso de un volumen igual de agua. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados, en la mezcla, de acuerdo con el peso. Todos los agregados minerales son porosos y pueden absorber agua y asfalto a un grado variable. La razón de absorción entre el agua y el asfalto varía con cada agregado. Los tres métodos para medir el peso específico del agregado, como se observa en la Figura 7, toman estas variaciones en consideración:

- **Peso Específico Total:** Incluyen todos los poros de la muestra
- **Peso Específico Efectivo:** Excluye del volumen de la muestra, todos los poros y espacios capilares que absorben asfalto.
- **Peso Específico Aparente:** No incluye como parte del volumen de la muestra, los poros y espacios capilares que se llenarían de agua al mojar la muestra.

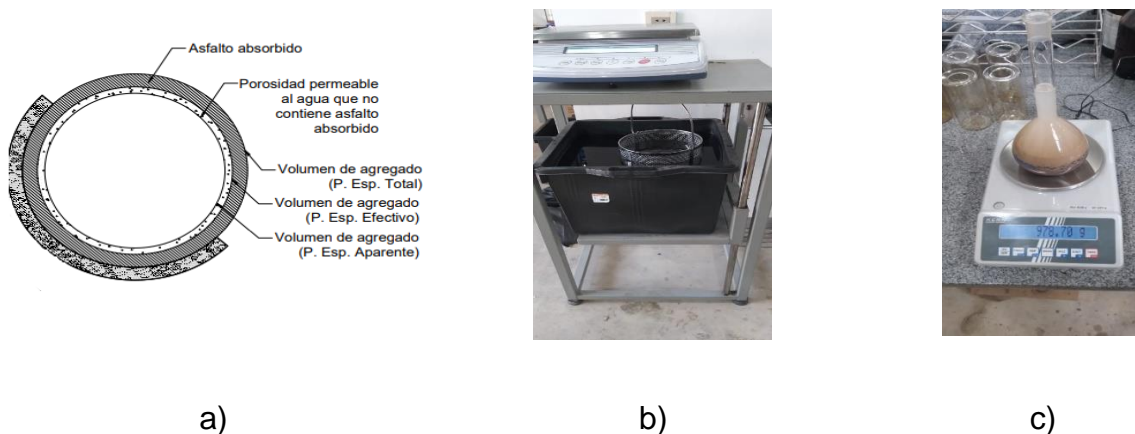


Figura 7 - (a) Proporciones Volumétricas del agregado. Fuente: Instituto Chileno del asfalto, ICA año 1992. (b) Peso Específico del agregado grueso y (c) fino en Strata

Fuente: Elaboración Propia

2.3.3.3 DUREZA

2.3.3.3.1 FORMA, ANGULARIDAD Y TEXTURA

2.3.3.3.1.1 AGREGADO GRUESO

Según su forma, afecta principalmente a la resistencia mecánica de las partículas y, por tanto, a la estructura mineral del árido. La forma de las partículas gruesas y la angularidad contribuye a que las partículas gruesas permanezcan en su lugar cuando el pavimento entre en funcionamiento y no se produzcan desplazamientos. La resistencia a la deformación o capacidad de soporte de una capa de pavimento depende esencialmente del rozamiento interno del esqueleto mineral y, en su caso, de la cohesión que proporciona el eventual ligante o conglomerante. El rozamiento interno aumenta con partículas angulosas y de textura superficial áspera como por ejemplo los agregados triturados Figura 8 (a), que pueden variar desde ser muy rugosas hasta pulida. Según su forma, como se observa en la Figura 9 (b), las partículas pueden clasificarse en redondeadas, irregulares, angulares, lajosas, alargadas y alargadas - lajosas. Las partículas lajosas y alargadas son susceptibles a quebrarse con facilidad durante la compactación, así como también bajo la acción del tráfico, eso conlleva la modificación de la granulometría del agregado inicial. Su contenido en la mezcla debe limitarse. [8]



Agregado Angular



Agregado redondeado

Figura 8 - (a) Efecto de la forma de agregado en el VAM

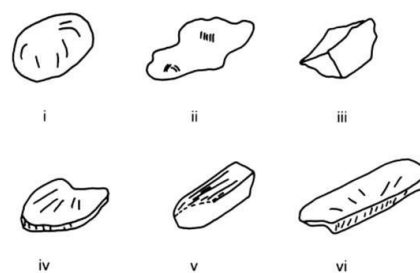


Figura 9 - (b) Forma de las Partículas de Agregado Pétreo

2.3.4.3.2 AGREGADO FINO

La angularidad del agregado fino garantiza el rozamiento entre las partículas y así como también brinda resistencia a la deformación permanente. Se define como el

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

porcentaje de vacíos de aire presentes en los áridos con granulometría inferior a 2,36 mm, en estado suelto. El uso de arenas de trituración aumenta la fricción interna en la mezcla asfáltica ya que presentan más caras de fractura aumentando el VAM (Vacíos de agregado Mineral) de las mezclas de diseño con respecto a las de una arena de río. Topal y Sengoz (2005).

2.3.4. ÍNDICE DE LAJAS

Se define como Índice de Lajosidad de una fracción de agregados el porcentaje en peso de las partículas que la forman en cuya dimensión mínima (espesor) es inferior a 3/5 de la dimensión media de la fracción. (Dirección Nacional de Vialidad - 1º Distrito Buenos Aires). Se observa en la siguiente Figura 10 el calibre utilizado para su determinación.

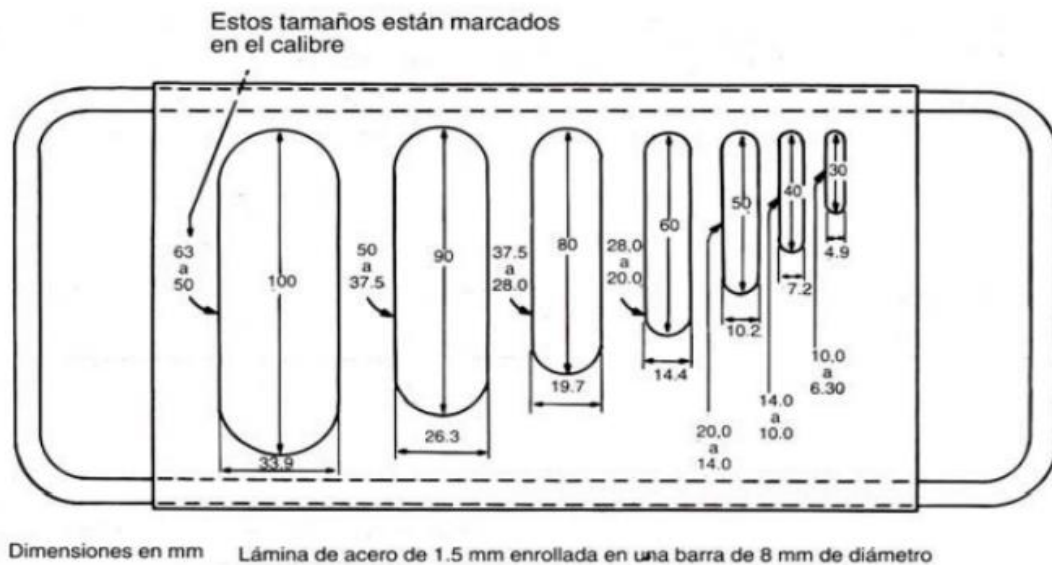


Figura 10 - Calibre para determinar el Índice de Lajas.

2.3.4.1 ÍNDICE DE ELONGACIÓN

Se define como Índice de Elongación de una fracción de áridos el porcentaje en peso de las partículas que la forman, cuya dimensión máxima (longitud) es superior a 9/5 de la dimensión media de la reacción. (Dirección Nacional de Vialidad - 1º Distrito Buenos Aires).

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

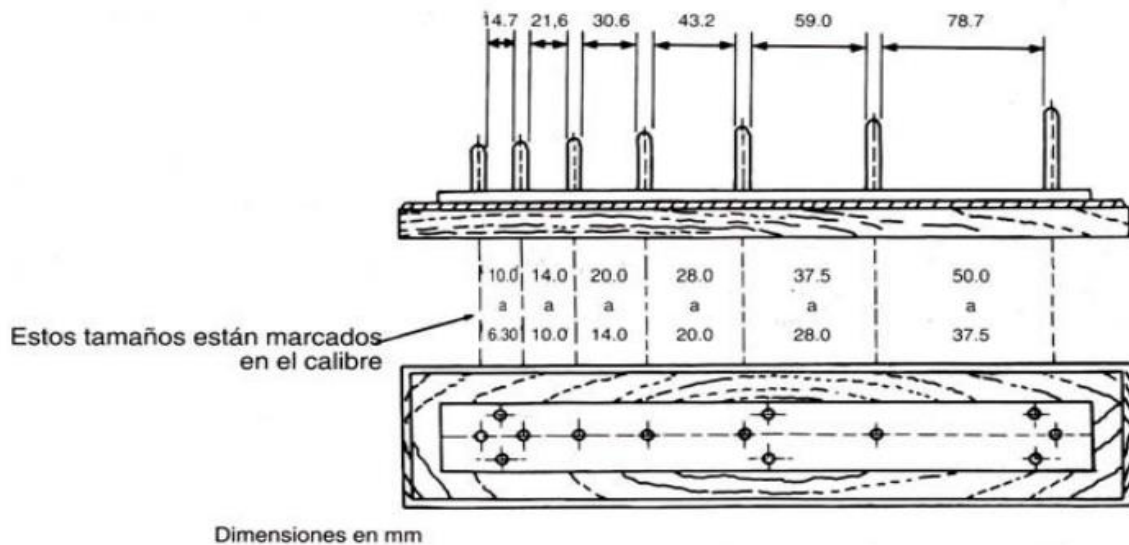


Figura 11 - Calibre para la Determinación del Índice de Agujas

Fuente: (Padilla,2004) [8]

2.3.4.1.1 CARAS DE FRACTURA

La forma de los agregados de mayor o menor angulosidad tiene influencia en la resistencia de la estructura mineral. Para este ensayo se determina el porcentaje de partículas con dos o más caras de fractura.

2.3.4.2 RESISTENCIA DE LOS AGREGADOS AL DESGASTE.

Los agregados pétreos deben ser resistentes ante el desgaste que se genera durante el proceso constructivo y la acción del tráfico.

Las pruebas de abrasión miden la calidad relativa y la durabilidad de los agregados minerales cuando estos son sometidos a la abrasión e impacto. Para determinar estos efectos se realizan, ensayos de laboratorio, que tienden a reproducir de manera más sencilla el comportamiento que luego tendrán los agregados en servicio, se proceden a preparar las muestras con granulometrías próximas a las que van a ser puestas en obra, sometiéndolas a un desgaste que, de forma indirecta, proporciona información de la resistencia mecánica del material.

El ensayo de Desgaste de Los Ángeles es un ejemplo de este tipo de ensayos. (Padilla

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

[8]), Figura 12 (a). También se realiza el ensayo de Micro Deval, Figura 12(b), que determina el desgaste que sufren los agregados gruesos al ser sometidos a la acción combinada de abrasión y molienda con bolas de acero en presencia de agua (Hoare, 2003).

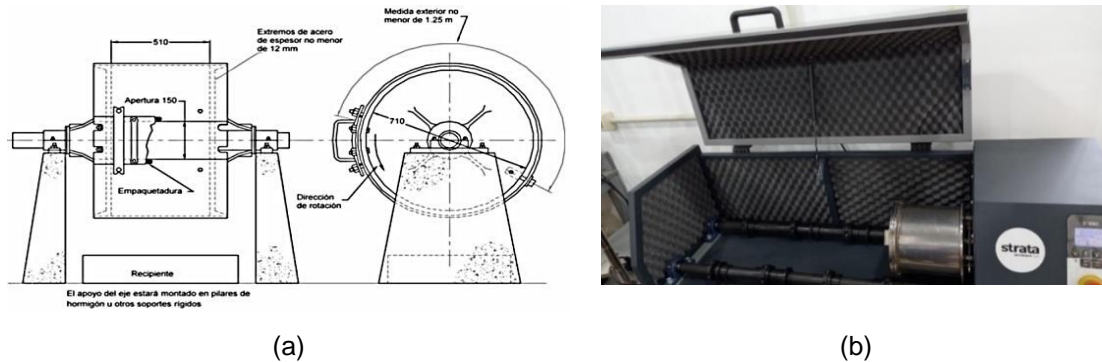


Figura 12 - (a) Máquina de desgaste de los ángulos. Fuente: Padilla (2004),
(b) Máquina de Microdeval.

Fuente: Elaboración Propia

2.3.4.3. RESISTENCIA AL PULIMENTO Y AL DESLIZAMIENTO

La resistencia al pulido generalmente es caracterizada a través del ensayo de pulimento acelerado, Figura 13 (a). La resistencia al deslizamiento es la capacidad para atenuar la fuerza desarrollada entre la superficie del pavimento y los neumáticos, cuando ésta se encuentre mojada y pueda evitarse el hidropneumático. Las características del agregado y la mezcla, y la textura de la superficie son propiedades del agregado, que influyen en la macrotextura y en la microtextura, como se observa en la Figura 13 (b). Estas propiedades afectan a largo plazo en la durabilidad, por ende, la mezcla debe tener la capacidad de resistir al pulimento y la abrasión ante el tránsito y los efectos ambientales. El ensayo consta de tres pasos principales: la preparación de los especímenes, el pulido de los especímenes en la máquina de pulimento acelerado y el ensayo de fricción con el péndulo británico.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

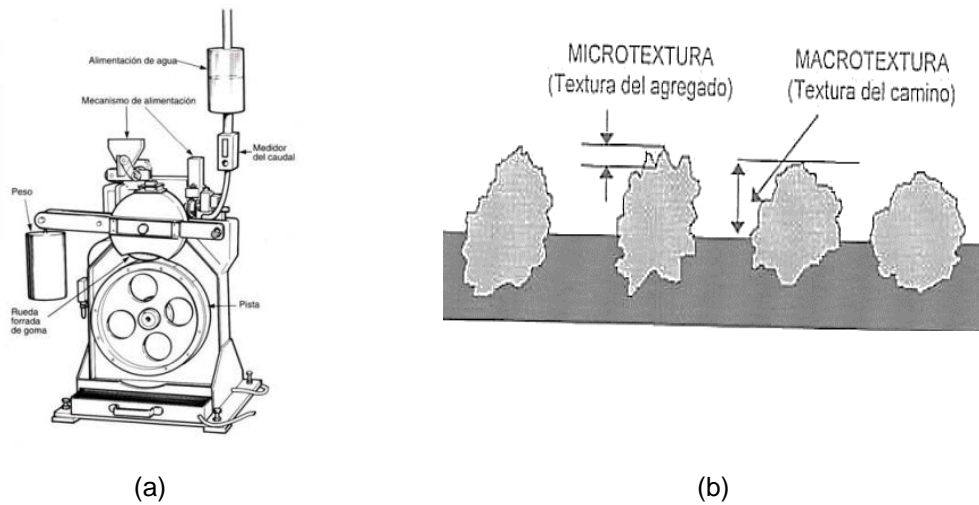


Figura 13 - (a) Maquina de Pulimiento acelerado, (b) Macrotextura del agregado.

Fuente: Padilla [8]

En la Figura 14 se esquematiza el efecto de la macrotextura y microtextura en la resistencia al deslizamiento como una función de la velocidad. Se puede observar que, para mantener un valor de resistencia al deslizamiento alto en varios niveles de velocidad, la superficie de rodamiento del pavimento obliga a una buena microtextura y macrotextura.

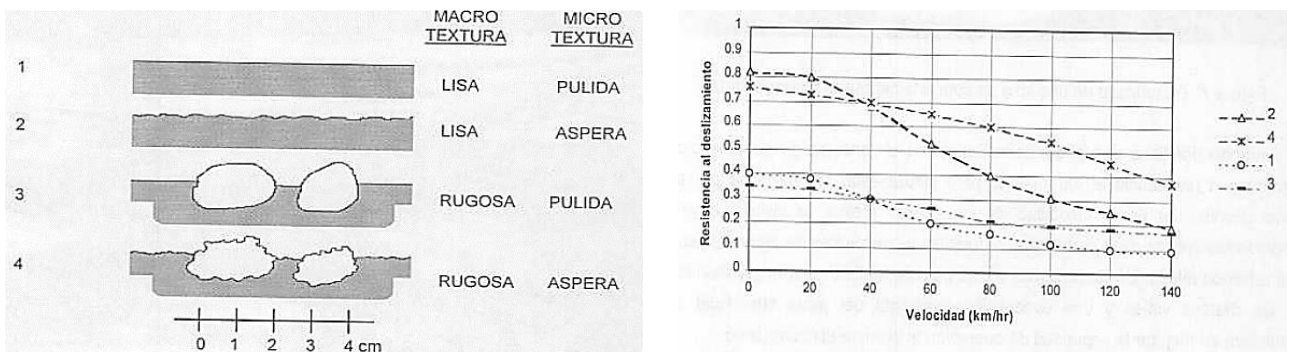


Figura 14 - Influencia de la textura y la velocidad

Fuente: Publicación Técnica No.111 Sanfandila, Qro, 1998 [9]

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

La macrotextura se puede medir en forma puntual con un ensayo denominado parche de arena según la norma IRAM 1555 (2010), Figura 15 (a). La microtextura se puede medir en forma puntual con un ensayo denominado péndulo inglés TRRL según la norma IRAM 1850 (2010), Figura 15 (b).



(a)



(b)

Figura 15 - (a)Parche de Arena, (b) Péndulo TRRL

2.3.4.4. ADHESIVIDAD Y RESISTENCIA AL DESPLAZAMIENTO

Esta propiedad superficial en los pavimentos asfálticos es muy importante para que este resulte resistente y durable es necesario que los ligantes se adhieran bien a los agregados pétreos, hay que tener en cuenta las posibles acciones del agua en combinación con el tráfico de los vehículos y en ocasiones con el polvo, no permitan una buena adhesividad, tendiendo a desplazar el ligante asfáltico de la superficie del agregado, que quedará de nuevo descubierta o lavada.

Para ello, se realiza el ensayo de adhesividad agregado–ligante mediante la caracterización de la acción del agua. Se enmarcan unos parámetros mínimos en los valores de inmersión – compresión según el tipo de mezcla asfáltica a utilizar. (Padilla, 2004). Para determinar la adhesividad se realiza el ensayo de Adhesividad del asfalto. Para el caso con áridos gruesos se realiza mediante el Ensayo de Hervido de Texas y para el caso con áridos finos el Método de Riedel Weber.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.3.4.5. CONTENIDO DE IMPUREZAS Y PLASTICIDAD

El ensayo permite determinar el contenido de partículas inferiores a 0.5 mm, que se encuentran adheridas a la superficie de los agregados gruesos. Para que un agregado pétreo se comporte adecuadamente dentro de cualquier capa de pavimento, debe estar completamente limpio, libre de partículas indeseables como son, materia orgánica, arcillas o polvo, [10]. Las normas indican, que todos los finos deben tener reducida su plasticidad e incluso que no sean plásticos en la mayoría de los casos. Es necesario asegurarse bajo la presencia del agua la capa asfáltica, conserve sus propiedades de resistencia y que no se produzcan problemas de adherencia al material bituminoso.

En ocasiones, aunque el agregado fino no sea plástico, puede encontrarse contaminado, es decir pudiendo contener partículas de tamaño arcillosas, lo que en una mezcla asfáltica es indeseable ya que su exceso induce a una pérdida de adherencia con el ligante y por ende la necesidad de incrementar el contenido de asfalto para aglomerarlo. Para estos casos se utiliza el ensayo de Equivalente de arena Figura 16 este permite evaluar el contenido de esas partículas adheridas al agregado fino.

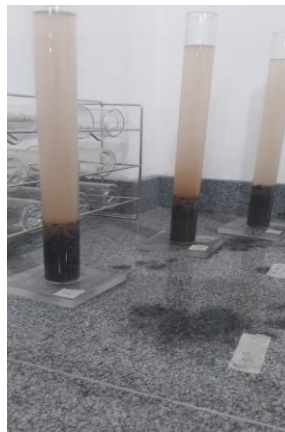


Figura 16 -
Equivalente de arena.

Fuente: Elaboración Propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.3.4.6 POLVO ADHERIDO

Es la cantidad de polvo adherido a la superficie de los agregados pétreos que no se desprende totalmente por simple tamizado, referido a un área superficial total, contenida en un peso de 200 gr. de los agregados que están dentro del rango de tamices entre el 3/8" y N° 4, expresado volumétricamente en ml. de polvo adherido por 100 gr. de agregado.

2.3.4.7 CONCENTRACIÓN CRÍTICA

Las llenantes minerales o fillers son materiales incorporado al ligante asfáltico con el fin de modificar sus propiedades mecánicas, consistencia y complementar la fracción granulométrica en la mezcla asfáltica producida en caliente, para generar una mezcla bien graduada y un mejor comportamiento de esta.

El efecto general de la adición de fillers es endurecer el asfalto. En términos prácticos significa que existirá una reducción en su deformación o fluencia producida por una carga, un incremento en su punto de ablandamiento, una reducción de su penetración y un incremento en su rigidez. El filler tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas debido a que:

- Forma parte del esqueleto mineral y soporta las tensiones por rozamiento interno o por contacto entre partículas.
- Rellena los vacíos del esqueleto de agregados gruesos y finos, por lo tanto impermeabiliza y densifica el esqueleto.
- Proporciona mayor adherencia entre agregados de mayor tamaño y los agrupa limitando sus movimientos, aumentando así la estabilidad del conjunto.
- Mayor estabilidad y durabilidad, por aumento del espesor promedio de la película de asfalto.

Sin embargo, el aumento de las propiedades expuestas va en detrimento de la flexibilidad de la mezcla asfáltica. Flexibilidad entendida como la capacidad de una capa asfáltica de adaptarse a la capa inferior de apoyo, acompañando sus deformaciones sin sufrir fisuras.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

A fin de evitar problemas de rigidez en los pavimentos al no tener en cuenta este factor, es indispensable saber la concentración en volumen de llenante mineral a utilizar en una mezcla asfáltica. La concentración crítica es un factor importante en la cual la mezcla comienza a rigidizarse.

El agregado de filler a un betún asfáltico modifica la relación entre esfuerzos y deformaciones considerando tiempo y temperaturas constantes. Se ha demostrado que hasta una cierta relación en volumen entre determinado filler y el betún, el agregado de filler aumenta la resistencia viscosa del betún a temperatura constante y, en consecuencia, su módulo de deformación, de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$C_v = \frac{\text{vol. Filler}}{\text{vol. Filler} + \text{vol. betun}} = \frac{\frac{P_f}{G_1}}{\frac{P_f}{Y_f} + \frac{P_b}{Y_b}}$$

Esta relación no es infinita, continúa hasta que el valor de C_v iguala a un valor C_s denominado Concentración Crítica a partir del cual el sistema filler-betún deja de comportarse viscoso.

El valor C_s es la máxima concentración que puede aplicarse cuando se desea utilizar al filler como medio de incrementar la estabilidad de la mezcla sin sacrificar su flexibilidad. Este criterio no significa que no puedan utilizarse concentraciones mayores de filler, sólo indica que la mayor estabilidad obtenida se consigue con sacrificio parcial de la flexibilidad. El valor de la concentración critica debe ser mayor que la concentración real en volumen de la llenante en una determinada mezcla asfáltica, con el fin de evitar problemas de rigidez en el pavimento.

Esta concentración corresponde a una dispersión de las partículas de filler en el betún en el estado más suelto posible, pero con contacto entre ellas, es decir cuando el esfuerzo aplicado es consumido en la deformación viscosa del medio continuo bituminoso y la resistencia friccional entre las partículas tiende a un minuto. Dicho acomodamiento de las partículas es el que aproximadamente cabe esperar en el sedimento obtenido por simple reposo de dispersiones de filler en un medio líquido fluido

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

y con parentesco químico con los betunes, tal como el kerosene. En la Figura 17 se muestran los ensayos realizados a los agregados:



(a)



(b)

Figura 17 - (a)Ensayo de concentración critica de la Cal (b) Ensayo de concentración critica del pasante Tamiz N° 200.

Fuente: Elaboración Propia

2.3.4.8 ATAQUE POR SULFATOS

Mediante este método puede obtenerse una información útil para juzgar la calidad de los áridos que han de estar sometidos a la acción de los agentes atmosféricos, sobre todo cuando no se dispone de datos sobre el comportamiento de los materiales que se van a emplear en las condiciones climatológicas de la obra

2.3.5 RESISTENCIA AL DESPRENDIMIENTO

De acuerdo con Padilla (2004), los defectos de adhesión significan la quiebra de las fuerzas de unión entre el agregado y su cubierta de conglomerante asfáltico, lo que conduce a una separación física, una posible consecuencia de los defectos de adhesión, es el fallo mecánico por desgaste y desflecado de la superficie, pero el fallo mecánico no se produce inmediatamente después del fallo de adhesión, si el desprendimiento, aunque sea permanente, se produce a un nivel inferior de la construcción y el grado de entrecruzamiento físico de las partículas de agregado es suficiente para resistir el esfuerzo del tráfico. El desprendimiento es un fenómeno relacionado con la presencia de

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

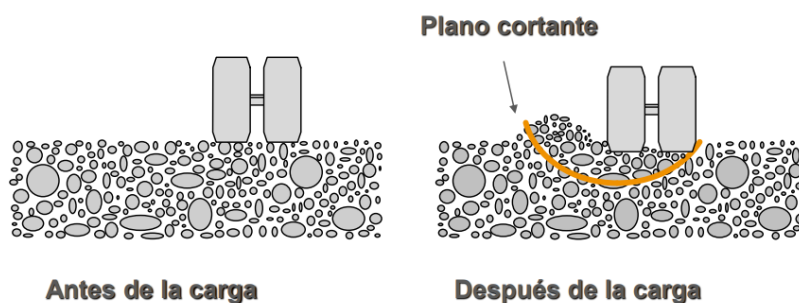
agua. Se deduce que los pavimentos densos, con bajos contenidos de vacíos, son prácticamente inmunes y que el comportamiento de los agregados pétreos en los ensayos de deslizamiento es bastante insignificante en dicho uso.

2.3.6 COMPORTAMIENTO DEL AGREGADO MINERAL

Los agregados minerales utilizados para hacer mezclas asfálticas pueden ser naturales, triturados o sintéticos. Los naturales se extraen de depósitos fluviales o glaciares, y utilizados sin ningún procesamiento para elaborar la mezcla asfáltica. Los áridos triturados se extraen en canteras y se trituran al tamaño deseado mediante trituración mecánica. Los agregados sintéticos, por otro lado, son subproductos industriales como la escoria de alto horno.

Independientemente de la fuente, los métodos de procesamiento o la mineralogía, se espera que el agregado forme un esqueleto pétreo para que pueda resistir las aplicaciones de carga repetidas.

Los agregados pétreos de textura rugosa tienden a tener mayor resistencia que los redondeados y de textura lisa. Cuando una masa de agregados es cargada, puede generarse dentro de la masa un plano por el que las partículas se deslicen o cizallen unas respecto de las otras Figura 18, lo cual resulta en una deformación permanente de la masa. Es en este plano donde las tensiones de corte exceden a la resistencia al corte de la masa de agregados. La resistencia al corte del agregado es de especial importancia en la mezcla asfáltica. En la Figura 19 se puede observar el comportamiento de los agregados según su forma.



DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

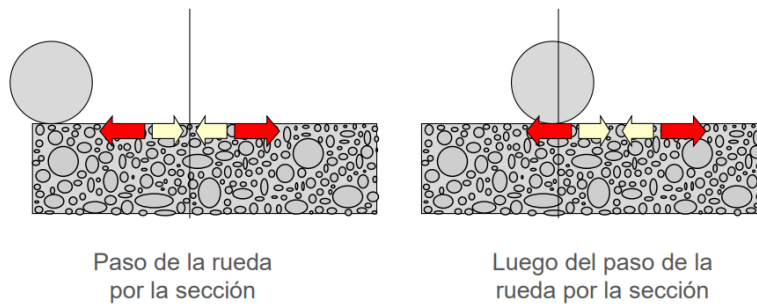


Figura 18 - Comportamiento del agregado sometido a carga de corte.

Fuente: (Garnica, Flores, Gómez, & Delgado, 2005) [11]

La resistencia al corte de varios agregados puede explicarse mediante la teoría de Mohr-Coulomb. Esta teoría establece que la resistencia al corte de una mezcla de agregados depende de qué tan fuertemente se unen las partículas de agregado (cohesión) esfuerzo normal experimentado por el agregado y fricción interna. Por otro lado, al someter una masa de agregado a tensiones de corte, las partículas deben fracturarse o arrastrarse unas sobre otras si se produce un desplazamiento. Este fenómeno se llama dilatancia, pues resulta en una expansión o incremento de volumen de la masa de agregados. Los materiales resistentes, con una mayor densificación y alto ángulo de fricción interna, tienden a dilatarse más que los materiales más débiles (Asphalt Institute SP-2, 1996). [12]

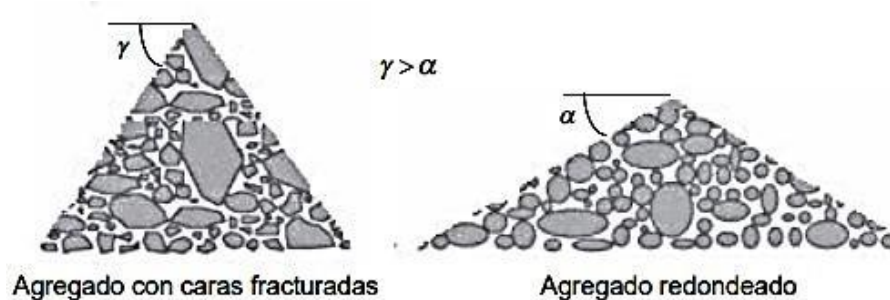


Figura 19 - Comportamiento de los agregados en las pilas de acopio.

Fuente: (Garnica, Flores, Gómez, & Delgado, 2005) [11]

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.4 LIGANTE ASFÁLTICO

El ligante asfáltico, esta caracterizado en tres etapas:


- Por su Origen: Producto mineral de color marrón oscuro a negro, proveniente de la fracción más pesada del petróleo crudo, durante el proceso de refinación.
- Por su comportamiento: es un material adhesivo de comportamiento reológico viscoelástico, es decir, tiene un comportamiento elástico y plástico simultáneamente. La viscosidad del ligante varía en función de su temperatura.
- Por su composición Química: Compuesto orgánico formado por átomos de Carbono e Hidrogeno, saturados, asfáltenos, resinas y aromáticos.

Tiene como principales características su capacidad para aglutinar elementos, consistencia y ductilidad. Por sus propiedades de consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad, tiene gran variedad de aplicaciones en la construcción de pavimentos flexibles como, por ejemplo, mezclas asfálticas, bases estabilizadas, riegos de sello, emulsiones asfálticas, riegos de liga, riegos de impregnación, entre otros. El comportamiento reológico del ligante debe tenerse en cuenta al seleccionar el cemento asfáltico que se vaya a utilizar para producir la mezcla, de tal forma a que este sea adecuado en términos de servicio (nivel de tráfico, velocidad de la aplicación de la carga, la temperatura) para los cuales estará sujeto el pavimento.


DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.4.1. PROPIEDADES DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS

2.4.1.1 DENSIDAD

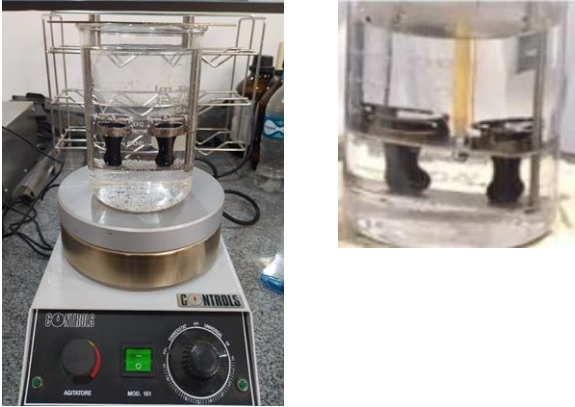
Descripción	Determinación
<p>La densidad de los ligantes asfálticos que se utilizan en la construcción de pavimentos tiene un rango de variación de 0.9 - 1.4 kg/dm³.</p> <p>La densidad relativa de un ligante asfáltico es la razón entre el peso de un determinado volumen de ligante y el peso de un volumen igual de agua a una determinada temperatura, por ejemplo, a una temperatura de 25°C.</p>	<p>Se determina con un picnómetro, Figura 20, (Padilla, 2004). [8]</p>  <p>Figura 20 - lleno de asfalto, laboratorio Contec. Fuente: Elaboración Propia</p>

2.4.1.2 PENETRACIÓN

Descripción	Determinación
<p>Es una propiedad física del cemento asfáltico. Se define como la medida de consistencia del asfalto, se determina midiendo en décimas de milímetro, la longitud de una aguja normalizada que entra en una muestra en unas condiciones especificadas de tiempo, temperatura y carga.</p>	<p>Se determina mediante el ensayo de Penetración.</p>  <p>Figura 21 - Penetración del ligante. Fuente: Elaboración Propia.</p>


DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.4.1.3. PUNTO DE ABLANDAMIENTO

Descripción	Determinación
<p>Se refiere a la temperatura a la cual el cemento asfáltico se vuelve lo suficiente blando como para comenzar a fluir.</p> <p>Su determinación es, por tanto, arbitraria, la consistencia del asfalto disminuye gradualmente sin presentar un punto de fusión definido.</p>	<p>La determinación del punto de reblandecimiento puede hacerse por el método de anillo y bola. Figura 22.</p> <div data-bbox="868 589 1445 994"></div> <p>Figura 22 - Ensayo de anillo y bola.</p> <p>Fuente: Elaboración Propia</p>


DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.4.1.4 VISCOSIDAD

Descripción	Determinación
<p>Este ensayo tiene por finalidad determinar la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta que el pavimento suele experimentar durante su servicio. El equipo generalmente empleado es el viscosímetro rotacional de Brookfield, el cual determina la viscosidad rotacional mediante la medición del torque necesario para mantener una velocidad rotacional constante de un eje cilíndrico que gira sumergido en una muestra termostáticamente controlada. El torque está directamente ligado a la viscosidad del ligante. a temperatura más elevada a la que puede llegar a exponerse el pavimento en servicio. La viscosidad a 135°C es un valor aproximado del asfalto durante el mezclado y puesta en obra. (UNICAUCA, 2007)</p>	<p>El equipo generalmente empleado es el viscosímetro rotacional de Brookfield, el</p> <p>Figura 23</p>  <p>Figura 23 - Viscosímetro rotacional Brookfield.</p> <p>Fuente: Elaboración Propia</p>

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.4.1.5 DUCTILIDAD


Descripción	Determinación
<p>Los ligantes asfálticos se encuentran sometidos frecuentemente a variaciones de temperatura lo que provocan cambios dimensionales, para esto es necesario que el material asfáltico tenga suficiente ductilidad para alargarse sin que se produzcan grietas. La ductilidad en exceso tampoco es conveniente debido a que se presenta el riesgo de que aparezcan ondulaciones por efectos de las cargas del tráfico. (Padilla, 2004) [8]</p>	<p>Se determina por el ensayo de ductilidad. Figura 24</p>  <p>Figura 24 - Ensayo de ductilidad del Cemento asfáltico, Laboratorio Fiuna Fuente: Elaboración Propia</p>

2.4.1.6 VOLATILIDAD

Descripción	Determinación
<p>Esta propiedad da un índice de inalterabilidad del cemento asfáltico durante las operaciones previas a su puesta en obra. (Padilla, 2004) [8]</p>	<p>Indica la cantidad de aceites volátiles que contiene un asfalto, mediante calentamiento a una temperatura determinada durante un cierto tiempo. (Padilla, 2004) [8]</p>

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.4.1.7 PUNTO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN

Descripción	Determinación
<p>Según lo descrito por el Asphalt Institute (2001), el punto de inflamación es la temperatura, en el cual comienzan a arder los vapores del asfalto, esto ocurre cuando se aproxima a la superficie del material una llama de prueba. El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el cemento asfáltico se inflama y se quema. Es importante determinar estos puntos, debido a que el cemento asfáltico es calentado en su almacenaje, con el fin de mantener una viscosidad para que luego el material sea bombeado.</p>	<p>El procedimiento para determinar el punto de inflamación y de combustión consiste en calentar gradualmente una muestra del ligante asfáltico en una copa de latón mientras se aplica una llama sobre la superficie de esta. La temperatura en el momento en que se producen los destellos en la superficie se denomina punto de inflamación. Generalmente se aplica el Ensayo de Copa Abierta de Cleveland. Figura 25</p>  <p>Figura 25 -Ensayo de Copa Abierta de Cleveland.</p> <p>Fuente: Elaboración Propia</p>


DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.4.1.8. SOLUBILIDAD

Descripción	Determinación
<p>Este ensayo mide la uniformidad de la composición del asfalto y para determinar la cantidad de asfalto que consta un pavimento. (Padilla, 2004) [8]. Este ensayo determina las impurezas que posee un betún asfáltico.</p> <p>La solubilidad en disolventes orgánicos sirve también para hacer ensayos de recuperación del ligante en mezclas bituminosas durante o después del periodo de construcción. (Miro, 1994)</p>	<p>Se procede a disolver el asfalto en tricloroetano o tricloroetileno, se filtra y el porcentaje de material retenido con respecto al peso inicial, indica la impureza del betún, que no debe ser superior al 0,5%. Figura 26</p> <div data-bbox="933 728 1300 1243" data-label="Image"> <p>El diagrama muestra un aparato de filtración compuesto por un crisol de Gooch en la parte superior, conectado a un adaptador. Debajo del adaptador se encuentra un tubo de filtración que se inserta en un frasco de filtración. El frasco de filtración tiene un tapón de neopreno en su boca superior. El frasco de filtración es un recipiente cónico con un tubo lateral en su parte superior.</p> </div> <p>Figura 26 - Aparato de Filtración.</p>


DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.4.1.9. FRAGILIDAD

Descripción	Determinación
<p>De acuerdo con el Manual de Carreteras del Paraguay (2019) [13], el punto de fragilidad en una película de asfalto se define como la temperatura a la cual se produce fisuras o roturas en el material, que ocurre cuando sobrepasa su límite elástico.</p>	<p>En el ensayo de punto de fragilidad Fraass, una película del material se somete a condiciones sucesivas de flexión a temperaturas decrecientes.</p>  <p>Figura 27 - Aparato Fraass.</p> <p>Fuente: ("Aparato Fraass para Punto de Rotura - Aglutinante de Bitumen (Betún) y Bituminosas - Utest Material Testing Equipment") [32]</p>

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.4.1.10. ENVEJECIMIENTO


Descripción	Determinación
<p>De acuerdo con el Asphalt Institute (2001), los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción y también en el pavimento terminado. El endurecimiento generalmente es causado por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas de agregado).</p>	<p>Los procedimientos de ensayos constan de dos mecanismos diferentes: volatilización de ligeros presentes en el asfalto y oxidación por la reacción con el oxígeno del medio ambiente (Garnica 2004) [14]. Los ensayos pueden ser los siguientes: TFO, SM, RTFO, RMFO, TODT, TF</p>  <p>Figura 28 - Horno rotatorio de película delgada (RTFO)</p> <p>Fuente: Elaboración Propia</p>

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.4.1.11. PERMEABILIDAD

Descripción	Determinación
La impermeabilidad de los ligantes asfálticos es una de las características más típicas. Se debe, en primer lugar, a que la solubilidad del agua en dichos materiales es muy pequeña y, además, a la elevada viscosidad de tales productos	Cuanto menor es la penetración de un producto asfáltico, más lentamente se difunde el agua a través de él (Padilla, 2004). [8]

2.4.1.12. ADHERENCIA

Descripción	Determinación
La adherencia se representa como la resistencia que presenta un producto asfáltico al desprenderse de un agregado pétreo, pero esta adherencia no puede tener lugar más que si el agregado mineral es mojado por el asfalto. Además de esto, se tiene en cuenta la polaridad entre las moléculas de uno y de otro cuerpo.	 <p data-bbox="890 1238 1353 1312">Figura 29 - Adherencia Ligante - Agregado</p> <p data-bbox="924 1339 1316 1375">Fuente: Elaboración Propia</p>

2.4.2 COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DEL LIGANTE ASFÁLTICO

La reología se define como la ciencia, que estudia la deformación y flujo de los materiales, midiendo la respuesta mecánica de un material bajo sollicitaciones, cuyas propiedades varían en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de una carga, excluyéndose los fenómenos de rotura. Los ligantes asfálticos son materiales viscoelásticos que presentan un comportamiento reológico muy complejo. El comportamiento del cemento asfáltico es altamente dependiente del tiempo y temperatura de carga, pasando desde un comportamiento elástico y viscoso a uno

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

viscoelástico, como se observa en la Figura 30.

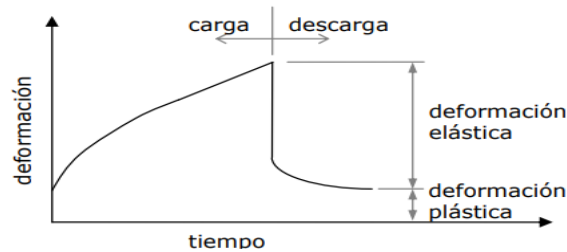


Figura 30 - Modelo reológico del comportamiento de materiales viscoelásticos

Fuente: Guillermo Thenoux [3]

Una forma de caracterizar el comportamiento viscoelástico del asfalto a temperaturas intermedias es a través de un reómetro de corte dinámico (DSR) como se observa en la Figura 31.



Figura 31 - Reómetro de Corte Dinámico, Laboratorio Strata.

Fuente: Elaboración propia.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Los parámetros que se caracterizan son: la resistencia total a la deformación (G^* llamado módulo complejo) y la distribución relativa en esa resistencia, entre la parte viscosa y la parte elástica (δ llamado ángulo de fase).

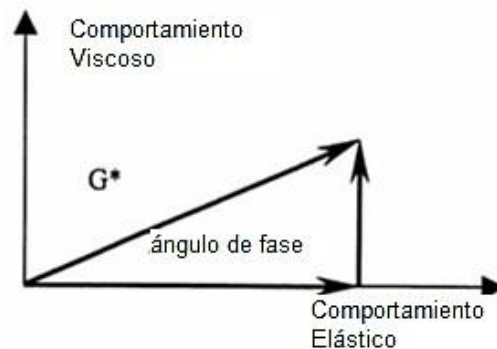


Figura 32 - Rigidez del ligante asfáltico y ángulo de fase.

Fuente: (Gerald, 1999) [15]

La forma experimental más extendida de caracterizar este comportamiento es a través de ensayos dinámicos de oscilación, en los que se mide un Módulo complejo G^* que representa la relación entre la máxima tensión de corte aplicada y la máxima deformación experimentada por el material, mientras que un ángulo de fase δ , es la diferencia de fase entre la tensión y la deformación, y que da una idea sobre la distribución de las dos componentes, elástica y viscosa del material. La componente elástica está en fase y tiene un valor de $\delta = 0$ grados, mientras que la viscosa tiene un ángulo de fase $\delta = 90$ grados.

Hay que destacar que la dependencia de estas variables en función del tiempo o de la temperatura pueden relacionarse debido al principio de superposición frecuencia / temperatura. Se puede observar en la Figura 33 los cambios en la rigidez de los ligantes asfálticos debidos a los cambios en la temperatura.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

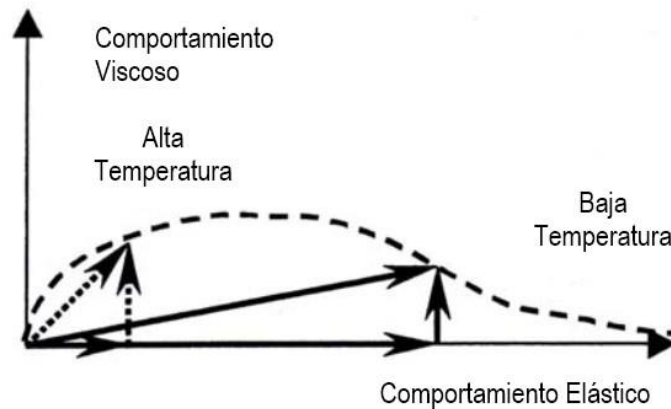


Figura 33 - Cambio de la rigidez del ligante asfáltico debido a la temperatura.

Fuente: (Gerald, 1999) [15]

A temperaturas bajas y frecuencias altas los asfaltos tienden a un G^* límite próximo a 1.0 GPa y a un $\delta = 0$ grados. El valor de G^* representa la rigidez de los enlaces carbono – hidrógeno al alcanzar los ligantes su volumen mínimo. Al aumentar la temperatura o disminuir la frecuencia G^* disminuye de forma continua y aumenta δ . La forma en que cambien será función de la composición del ligante, algunos lo harán de forma muy rápida y otros de forma más lenta, lo que hace que distintos asfaltos puedan tener distintos G^* y δ . A altas temperaturas el valor de δ se acerca a 90 grados para todos los asfaltos, lo que refleja el comportamiento completamente viscoso del material, pero los valores de G^* varían, lo que implica una diferencia en la consistencia de los asfaltos. A continuación, en la Figura 34, se presentan los diferentes intervalos de temperatura relacionados con las propiedades reológicas de un ligante asfáltico incluyendo también el posible deterioro del pavimento que puede originarse. (Padilla, 2004) [8]

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

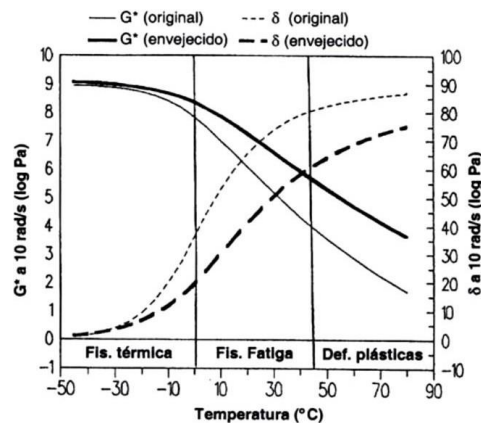


Figura 34 - Propiedades del ligante en función de la temperatura.

Fuente: (Ruiz & Pérez, 2002) [16]

2.5 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas han sido diseñadas durante años con procedimientos empíricos de laboratorio, lo que conlleva a requerirse experiencia en campo para determinar, si el análisis de laboratorio tiene correlación con el desempeño del pavimento.

La mezcla asfáltica, también recibe el nombre de aglomerados, está formada por una combinación de agregados minerales, aglomerados mediante un ligante asfáltico y mezclados de tal manera que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el comportamiento funcional de la misma como pavimento.

2.5.1. TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

La práctica de diseño de mezclas asfálticas ha recurrido a diferentes métodos, los más utilizados son el método Marshall, y el Hveem.

Existen varios parámetros de clasificación de mezclas asfálticas, para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y clasificaciones pueden ser diversas. Depende de las fracciones de agregado pétreo empleado en la elaboración de la mezcla, éstas

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

se dividen en mastico asfáltico; mortero asfáltico; macadam asfáltico; y concreto asfáltico. Por la temperatura de puesta en obra, se dividen en mezclas en frío y mezclas en caliente, también se clasifican de acuerdo a la proporción de vacíos de aire en la mezcla, este parámetro es imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas, tanto por las cargas del tránsito como las variaciones de temperatura, las mezclas pueden ser densas o cerradas, semidensas o semicerradas, abiertas y porosas, dependiendo de si tienen menos del 6% de vacíos, entre el 6 y el 12% de vacíos de aire, entre el 12 y el 18% o más del 20%, respectivamente. Otra clasificación se establece de acuerdo con la estructura de los agregados pétreos, así se tienen mezclas con o sin esqueleto mineral. Si se considera la curva granulométrica, se clasifican en mezclas asfálticas continuas o mezclas discontinuas (Padilla, 2004). [8]

2.5.2. MÉTODO MARSHALL

Este diseño de mezclas por el método Marshall es aplicable a mezclas en caliente, que contengan agregados pétreos de tamaño máximo absoluto o inferior a 25 mm, sigue un procedimiento normalizado ASTM D 1559 (American Society for Testing Materials, 1989). El método Marshall modificado esta desarrollado para agregados pétreos de tamaños máximos arriba de 38 mm (1.5"), tiene como objetivo determinar el contenido óptimo de asfalto y para la granulometría especificada para cumplir con los requerimientos de desempeño, durabilidad y trabajabilidad.

El procedimiento básico consiste en el siguiente diagrama de flujo, de acuerdo con el criterio de diseño Marshall del Instituto del Asfalto (USA), la determinación del contenido de asfalto óptimo se basa principalmente en los Vacíos de la Mezcla. El tenor óptimo de asfalto debe ser tal que los vacíos en la mezcla asfáltica compactada varíen de 3 a 5 %, y que se cumplan condiciones según el tipo de tránsito. respecto de:

- Estabilidad y Fluencia: este parámetro permite asegurar que la mezcla no sufra deformación.
- Vacíos en el Agregado Mineral: para permitir un suficiente espacio en el agregado para alojar el asfalto.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

- Vacíos Llenos de Asfalto: para permitir asegurar la durabilidad de la mezcla.

El contenido de vacíos de la mezcla debe controlarse en el campo. Esto se realiza a través del control de densidad insitu, debido a que existe una relación directa entre estos dos parámetros.

2.5.3. PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Los requerimientos de la mezcla preparada en laboratorio se realizan con el fin de determinar las características volumétricas y la influencia que estas pueden tener en el desempeño de la mezcla. Las características son:

- Densidad de la mezcla
- Vacíos de aire (V_a)
- Vacíos en el agregado mineral (VAM)
- Estimación del contenido de vacíos llenos de asfalto (VFA)
- Estimación del contenido de asfalto (P_b)

2.5.3.1 DENSIDAD DE LA MEZCLA

La densidad de la mezcla compactada se define como peso unitario (el peso de un volumen específico de mezcla). La densidad es una propiedad muy importante, ya que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

En el diseño y análisis de las mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa generalmente, en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3). La densidad se obtiene al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua que corresponde a $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$. La densidad que se obtiene en el laboratorio se convierte en la densidad patrón y se utiliza como referencia para determinar si la densidad de la unidad terminada es o no adecuada. Las especificaciones generalmente requieren que la densidad del pavimento terminado sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que muy rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

2.5.3.2 VACÍOS DE AIRE (VA)

Los vacíos de aire son intersticios pequeños de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que la mezcla tenga una proporción de agregados bien graduada, es decir que contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional.

El contenido de vacíos es uno de los parámetros más importantes que tienen que ver con el desempeño de la mezcla, por ende, la durabilidad del pavimento está en función del contenido de vacíos.

Diseñar y mantener un adecuado contenido de aire es importante por varias razones:

- A mayor contenido de vacíos, el pavimento se vuelve muy permeable al agua y al aire. Esto genera susceptibilidad a la humedad y al endurecimiento prematuro.
- A menor contenido de vacíos, generan contenidos de asfaltos mayores y también los vacíos llenos de asfaltos (VFA), esto genera susceptibilidad a la deformación, deslizamiento y exudación.

La densidad y el contenido de vacíos están proporcionalmente ligados. Entre mayor sea la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla y viceversa. En las especificaciones técnicas de obra, se requiere un grado de compactación del 98% de la gravedad específica bruta (G_{mb}), esto con el fin de que permita acomodar el menor número posible de vacíos, preferiblemente menos del 8%. Figura 35.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



Figura 35 - Mezclas Asfálticas en caliente.

Fuente: (Guillermo Thenoux) [3]

2.5.3.3 VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (VAM)

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) son los espacios intergranulares en la mezcla compactada, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

Los vacíos del agregado mineral representan el espacio intergranular para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla.

Los valores mínimos especificados para el VAM con relación al porcentaje de diseño de vacíos de aire del 4%, están en función del tamaño máximo del agregado. La Figura 36 ilustra el concepto de VAM y la Tabla 3 presenta los valores requeridos.

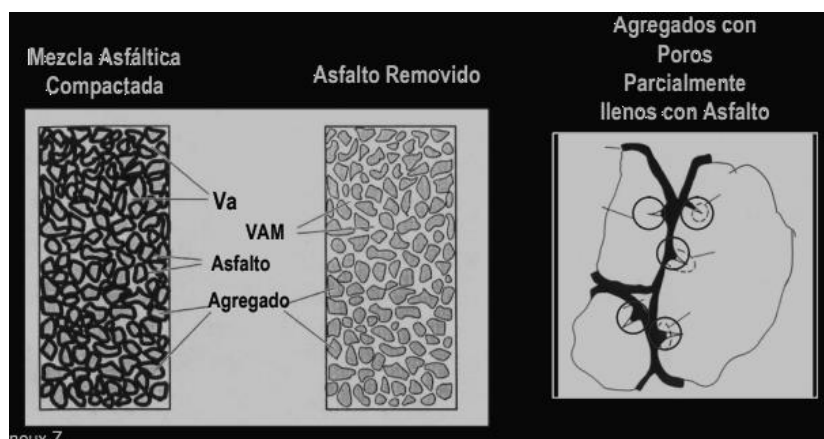


Figura 36 - Ilustración del VAM en una Probeta de Mezcla Compactada.

Fuente: (ASPHALT INSTITUTE, 2007) [17]

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Tabla 3 - Vacíos en el Agregado Mineral (Requisitos de VAM).

Tamaño Máximo		Vacíos de Diseño, %		
mm	ASTM	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19	20	21
4.75	No. 4	16	17	18
9.5	3/8	14	15	16
12.5	1/2	13	14	15
19	3/4	12	13	14
25	1	11	12	13
37.5	1.5	10	11	12
50	2	9.5	10.5	11.5
63	2.5	9	10	11

Fuente: (ASPHALT INSTITUTE, 2001) [17]

2.5.3.4 VACÍOS LLENOS DE ASFALTO VFA

Los vacíos llenos de asfalto VFA, representan el porcentaje de VAM que contiene ligante asfáltico. Consecuentemente, VFA es el volumen de ligante asfáltico efectivo expresado como el porcentaje de VAM, el rango del VFA varía de acuerdo con el porcentaje de Va de diseño 4% que está en función del nivel de tránsito, como se observa en la Tabla 4

Tabla 4 -Vacíos llenos de asfalto (Requisitos de VFA).

Criterio para VFA	
Tránsito, ESAL's (millones)	Porcentaje de VAM de diseño
< 0,3	70 – 80
< 1	65 – 78
< 3	65 – 78
< 10	65 – 75
< 30	65 – 75
< 100	65 – 75
>100	65 – 75

Fuente: (Garnica & Delgado, 2006) [14]

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.5.3.5 CONTENIDO DE ASFALTO DE LA MEZCLA

El contenido de asfalto es la concentración de masa del ligante asfáltico. La cantidad de asfalto en la mezcla es un factor muy importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio para luego ser controlada con precisión en la obra. El tenor de asfalto de una mezcla se establece usando los criterios dictados por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción de este. (Garnica & Delgado, 2006) [14]

2.6 COMPONENTES DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA

2.6.1 DIAGRAMA DE FASES

El diagrama de fases describe las propiedades de masa y de volumen de una mezcla asfáltica. Este considera una muestra compactada, con los vacíos de aire, cemento asfáltico y agregado mineral.

El agregado mineral que forma parte de la mezcla asfáltica es poroso, por ende, una parte del asfalto es absorbido por los poros del agregado, por tanto, una porción del agregado y del asfalto comparten espacio, a esta porción se le llama asfalto absorbido. La consideración de la absorción de asfalto permite subdividir la fase de volumen del asfalto en volumen de asfalto efectivo y volumen de asfalto absorbido, y la fase de volumen del agregado, en volumen de agregado total y volumen de agregado efectivo.

En la Figura 37 se muestra en forma esquemática el diagrama de fases utilizado para describir las propiedades de masa y volumen de una mezcla asfáltica compactada. (Garnica, Flores, Gómez, & Delgado, 2005). [11]

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

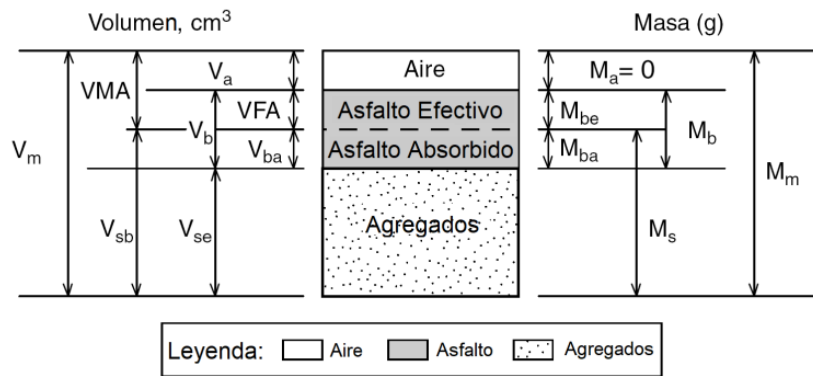


Figura 37 - Diagrama esquemático de fases de una mezcla asfáltica compactada.

Fuente: (Asphalt Institute SP-2,1996) [12]

V_{mb} = volumen total de la mezcla compactada	V_{ba} = volumen de asfalto absorbido
V_{mm} = volumen de la mezcla sin vacíos	V_{aire} = volumen de aire
VAM = volumen de vacíos en el agregado mineral	M_m = masa total de la mezcla compactada
V_{sb} = volumen total del agregado	M_a = masa de aire
V_{se} = volumen efectivo del agregado	M_b = masa de asfalto
V_{be} = volumen efectivo de asfalto	M_s = masa total del agregado

Las fases de asfalto efectivo y de aire de la mezcla, se consideran como volumen de vacíos en el agregado mineral y la fase de aire como el volumen de aire en la mezcla. Cuando los vacíos contienen únicamente asfalto ($V_a=0$), se dice que los vacíos están llenos, y se estima que la mezcla ha alcanzado su densidad máxima teórica, cuando existe tanto aire como asfalto, se considera que parte de los vacíos están llenos con asfalto, y que la mezcla ha alcanzado un determinado grado de saturación.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

La mezcla asfáltica compactada debe analizarse con base en el volumen, por tanto, es importante definir y entender cada uno de los volúmenes del diagrama de fases. (Garnica, Flores, Gómez, & Delgado, 2005) [11]. A continuación, se presentan las definiciones según Coree (1999) [18], y en la Figura 38 se ilustran dichos volúmenes para una mejor comprensión.

Volumen de asfalto efectivo Vbe	Volumen de asfalto absorbido Vba	Volumen total del agregado Vsb	Volumen efectivo del agregado Vse	Volumen aparente del agregado Vsa
Corresponde al volumen de asfalto que cubre las partículas, es decir, es el asfalto que no es absorbido por los poros del agregado.	Es el volumen de asfalto absorbido por los poros externos del agregado pétreo.	Corresponde al volumen total del agregado que comprende el volumen del sólido y el de los poros permeables al agua.	Corresponde al volumen del agregado que comprende el volumen del sólido y el de los poros permeables al agua que no están llenos de asfalto	Corresponde al volumen del sólido del agregado, es decir, no incluye el volumen de los poros permeables al agua.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

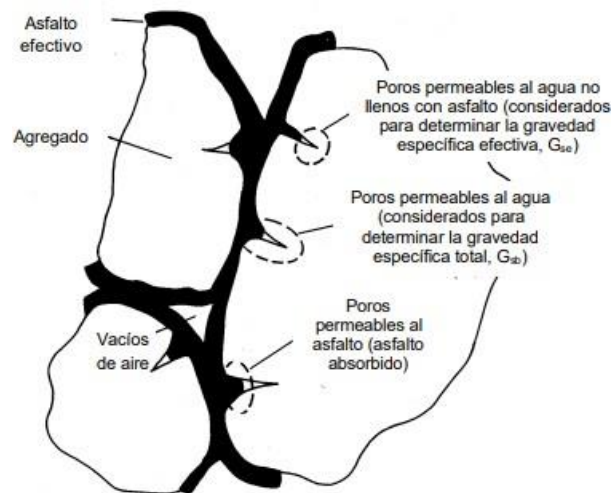


Figura 38 - Ilustración del volumen de aire, volumen de asfalto efectivo y volumen de asfalto absorbido en una mezcla asfáltica compactada.

Fuente: (Asphalt Institute MS-2, 1996) [12]

2.6.2 GRAVEDADES ESPECÍFICAS

Con el objeto de emplear el diagrama de fases, es necesario poder relacionar peso y volumen. Para ello, se utiliza la gravedad específica, que es la relación entre el peso de un volumen dado de una sustancia y el peso de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura. Es la única propiedad que tiene en cuenta dos determinaciones.

Primero, la gravedad específica es empleada para determinar el peso específico:

$$P.E = G * 1$$

Donde:

P.E: Peso específico del material en gramos por centímetro cubico (g/cm³)

G: Gravedad específica del material

1: Peso específico del agua en (g/cm³)

Segundo, conociendo el peso y la gravedad específica de un material, el volumen puede ser determinado con:

$$V = \frac{P}{G * 1}$$

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Donde:

V: Volumen del material

P: Peso del material

G: Gravedad específica del material

1: Peso específico del agua (g/cm³)

2.6.2.1 GRAVEDAD ESPECÍFICA NETA DEL AGREGADO, G_{sb}

La gravedad específica bruta (AASHTO T84 y T85) [19], se determina midiendo el peso seco y el volumen bruto de una muestra de agregados, el volumen bruto incluye el volumen del sólido del agregado más el volumen de agua contenida en los poros superficiales. Figura 39. (ASPHALT INSTITUTE, 1996) [12]

Sin embargo, cuando el agregado total consiste en fracciones de agregado grueso, agregado fino y filler, todos tienen gravedades específicas diferentes, por lo que es necesario determinar la gravedad específica para la combinación de agregado seleccionado mediante la siguiente ecuación:

$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}}$	<p>P1, P2, PN= porcentajes individuales por masa de agregado</p> <p>G1, G2, GN = gravedad específica total individual del agregado</p> <p>Gsb = gravedad específica total de la combinación de agregado seleccionado</p>
--	--

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

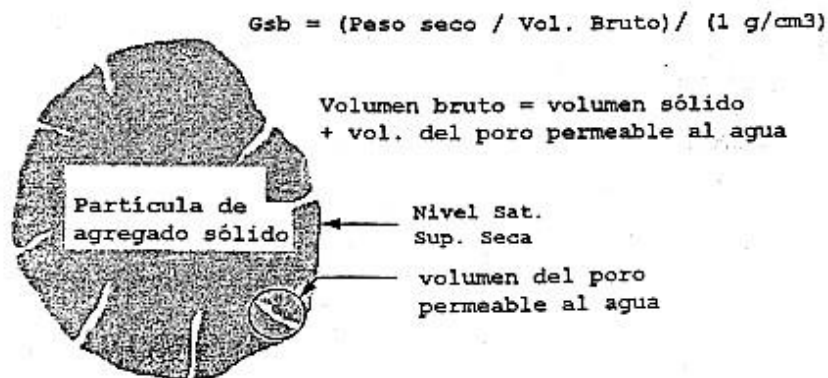


Figura 39 - Gravedad específica neta del agregado.

Fuente: (ASPHALT INSTITUTE, 1996) [12]

La gravedad específica neta o total del filler, resulta difícil de determinar, sin embargo, el error es usualmente insignificante cuando en su lugar se emplea la gravedad específica aparente del filler.

Es importante señalar que la gravedad específica total del agregado debemedirse en laboratorio con la mayor precisión posible, pues ésta es usada paraconvertir las masas medidas a volúmenes; y cualquier error pequeño en el G_{sb} se reflejará en un error significativo en el cálculo de volúmenes, lo cual podría noser descubierto (Asphalt Institute MS-2, 1996). [12]

2.4.2.1 GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE DEL AGREGADO, GSA

La gravedad específica aparente (también calculada con las normas AASTHO T84 y T85) [19], se determina midiendo proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material impermeable a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada. Figura 40. por lo que es necesario determinar la gravedad específica para la combinación de agregado seleccionado mediante la siguiente ecuación:

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

$G_{sa} = \frac{\text{Peso seco}}{\text{vol. aparente}}$	<p>G_{sa}=gravedad específica aparente de la combinación de agregado seleccionado.</p> <p>Ps = Peso seco del agregado</p> <p>Vol. Aparente= solo incluye el volumen del solido del agregado y no incluye el volumen de los poros de la superficie.</p>
--	--

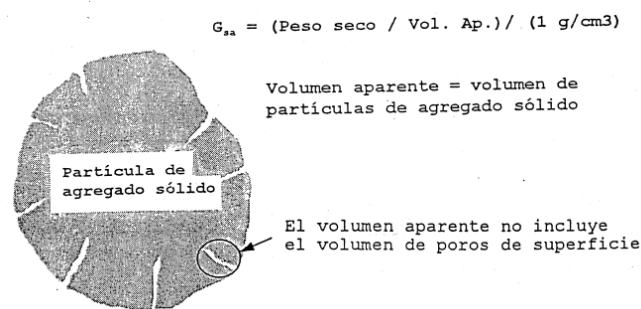


Figura 40 - Gravedad específica aparente del agregado.

Fuente: (ASPHALT INSTITUTE, 1996) [12]

2.6.2.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA EFECTIVA DEL AGREGADO, G_{se}

La gravedad específica efectiva se mide sobre la mezcla asfáltica (ASTHO T209), cuyo contenido de asfalto es conocido. Es la relación entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado (considera sólo el volumen de los poros permeables al agua no llenos con asfalto) y la masa de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura Figura 41, [20]. Esta gravedad depende del volumen de asfalto absorbido, por lo que se determina a partir de la gravedad específica máxima teórica de la mezcla. La gravedad específica efectiva, se calcula con la siguiente ecuación:

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$	<p>Gse= gravedad específica efectiva de la combinación de agregado seleccionado.</p> <p>Gmm= gravedad específica máxima (ASTM D2041/AASHTO T 209) de la mezcla suelta (sin vacíos de aire).</p> <p>Gb= gravedad específica del asfalto</p> <p>Pmm= porcentaje de masa del total de la mezcla suelta=100</p> <p>Pb= contenido de asfalto</p>
---	---

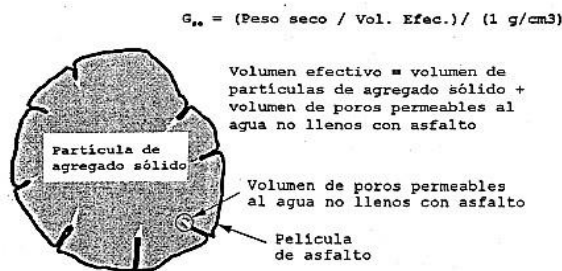


Figura 41 - Gravedad específica efectiva del agregado.

Fuente: (ASPHALT INSTITUTE, 1996) [12]

El valor para la gravedad específica efectiva de un agregado se ubica entre la gravedad específica total y su gravedad específica aparente. Cuando la gravedad específica efectiva se encuentre fuera de estos límites, se asume que el valor es incorrecto, y se debe volver a determinar la gravedad específica máxima teórica para encontrar la causa del error. [12]

2.6.2.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA, Gmm

En el diseño de una mezcla asfáltica para un agregado dado se necesitará la gravedad específica máxima Gmm, para cada contenido de asfalto con el fin de calcular el

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto, mediante (ASTM D 2041/ASSHTO T 209). Corresponde a la razón entre la masa de un volumen dado de mezcla asfáltica sin vacíos de aire y la masa de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura [20]

También se le nombra gravedad específica RICE, para darle reconocimiento al investigador James Rice, quien desarrolló el método de prueba.

Se necesita para el porcentaje de vacíos de aire para el contenido de asfalto, se calcula de la siguiente manera:

$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$	<p>Gse= gravedad específica efectiva de la combinación de agregado seleccionado.</p> <p>Gmm= gravedad específica máxima de la mezcla suelta (sin vacíos de aire).</p> <p>Gb= gravedad específica del asfalto.</p> <p>Ps= contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla</p> <p>Pmm= porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta=100</p> <p>Pb= contenido de asfalto, porcentaje por el total de la masa de la mezcla.</p>
--	--

2.6.2.4 GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL ASFALTO G_b

Es la relación entre la masa en el aire de un volumen dado de ligante asfáltico y la masa de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura, [20]

2.6.2.5 GRAVEDAD ESPECÍFICA TOTAL DE LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA, G_{mb}

Es la relación entre la masa en el aire de un volumen dado de mezcla asfáltica compactada y la masa de igual volumen de agua destilada, ambos a la misma temperatura, [20]

Algunos de los factores que afectan el desempeño de la mezcla como el tamaño

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

máximo de los agregados pétreos, la distribución granulométrica, el contenido y tipo de asfalto, los vacíos de aire y la porción de vacíos llenos de asfaltos pueden ser modificados mediante una adecuada dosificación de modo de obtener una menor deformación, mientras que la temperatura de la mezcla por efecto del clima, la presencia de agua, tipo y forma de sollicitación vienen dadas por las características del lugar y el tipo de vía donde será puesta la mezcla asfáltica. [21]

2.6.3 METODO SUPERPAVE

Las mezclas asfálticas al ser diseñadas mediante procedimientos empíricos de laboratorio implican que la experiencia en campo se vuelve necesaria para determinar si los análisis realizados en laboratorio tienen correlación con el desempeño del pavimento.

El Programa SHRP (Strategic Highway Research Program) es un proyecto de investigación desarrollado en Estados Unidos entre 1987 y 1993, este programa dio como resultado un sistema conocido como Superpave (Superior Performance Pavements), paquete que incluye nuevas especificaciones para asfalto y agregado, un nuevo método de diseño de mezclas asfálticas en caliente y un modelo de predicción del comportamiento de pavimentos.

Este método representa un sistema para especificar el cemento asfáltico y el agregado pétreo, así también desarrollar diseños de mezclas asfálticas, analizar y poder predecir el desempeño de la carretera, este programa se proyecta con el fin de contribuir a lograr pavimentos más durables y así minimizar los costos de conservación y operación de los vehículos que hagan uso de la infraestructura vial. [9]

En el diseño de mezcla asfáltica mediante el método Superpave, se utilizan básicamente los mismos criterios que el diseño Marshall, es decir, impera el diseño volumétrico. La principal diferencia son las especificaciones de los materiales, el método de compactación y análisis de la mezcla. En este método se desarrolló un nuevo equipo de compactación (Compactador Giratorio Superpave), que será objeto de estudio.

2.6.3.1 COMPACTACIÓN GIRATORIA SUPERPAVE

El Compactador Giratorio Superpave, es un equipo que permite elaborar en el

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

laboratorio muestras de mezcla asfáltica en caliente, para que luego sean ensayadas, este simula la compactación que se da en el sitio de la pavimentación en el campo, mediante el rodillo liso.

El proceso de compactación consiste en aplicar una carga de compresión sobre la muestra, mientras se hace girar el molde con un ángulo de giro de $1,25^\circ$ a una velocidad de 30 revoluciones por minuto. El número de giros que se debe aplicar depende de la cantidad de tránsito esperado en el proyecto. Los parámetros clave especificados se presentan a continuación:

- Presión de compactación: (600 ± 18) kPa perpendicular al eje del molde cilíndrico con un espécimen de 150 mm de diámetro. Figura 42
- Diámetro del molde: $(149,95 \pm 0,05)$ mm
- Ángulo de giro: externo de $(1,25 \pm 0,02)^\circ$ e interno de $(1,16 \pm 0,02)^\circ$
- Velocidad de rotación: $(30 \pm 0,5)$ revoluciones por minuto

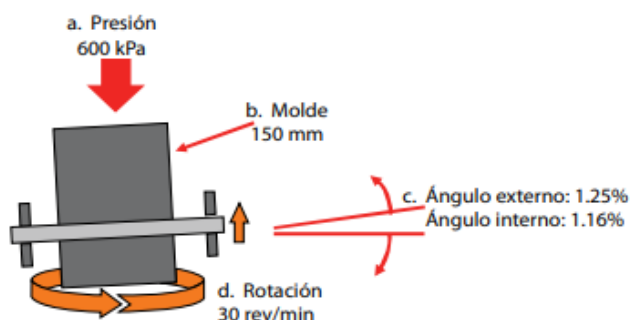


Figura 42 - Esquema del funcionamiento del compactador giratorio



Figura 43 - Compactador Giratorio

(a)

Fuente: Elaboración Propia

(b)

Fuente: Elaboración Propia

2.6.3.2 NUMERO DE GIROS

El número de giros a aplicar depende del diseño de mezcla, establecido para la cantidad de tránsito esperado, para lo cual se establece tres niveles de giros N inicial,

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

N diseño y N máximo, como se observa en la Figura 44, [3]

- N inicial: Es el número de giros utilizado para medir la capacidad de compactación de la mezcla está relacionado con el proceso de construcción en sitio. Las mezclas que se compactan muy rápido (la cantidad de vacíos de aire es muy baja) son mezclas blandas, que tienden a presentar desplazamientos laterales durante la construcción y ser inestables bajo la acción del tránsito. Por lo tanto, se establece un valor máximo de densidad relativa, es decir, un contenido de vacíos mínimo, para evitar el uso de este tipo de mezclas.
- N diseño: Es el número de giros requeridos para producir una muestra con la misma densidad esperada en el sitio, luego de que ha pasado la cantidad de tránsito de diseño. Normalmente, se busca un 4 % de vacíos de aire en el diseño de la mezcla asfáltica.
- N máximo: Es el número de giros para producir una densidad de laboratorio que no deber ser excedida en el sitio. Si los vacíos de aire son muy bajos, entonces la mezcla se compacta demasiado bajo la acción del tránsito que puede resultar en deformación permanente ("rutting"), de ahí que este valor no debe ser menor de 2 % en el diseño de mezcla.

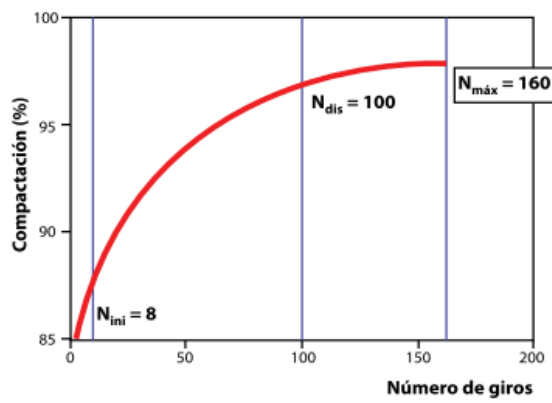


Figura 44 - Comportamiento de la compactación con relación al número de giros, Laboratorio Strata

Fuente: Elaboración Propia

Típicamente, las muestras se compactan a N diseño para establecer el tenor óptimo de asfalto y luego se compactan muestras adicionales a N máximo como un control.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Una vez que la compactación ha terminado, se remueve la probeta y se determina la densidad real y máxima de la mezcla. Luego se calculan en forma retroactiva las densidades y contenidos de vacíos para cada nivel de giro. A continuación, se observa en la Figura 45, los niveles para la cantidad de giros a aplicar que representa los niveles de tránsito definido por ejes equivalentes ESAL'S.

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

Figura 45 - Número de giros de compactación que se utiliza de acuerdo con los Ejes Equivalentes.

Fuente: Método AASTHO tabla 1, 2004 [22]

2.6.3.3. SELECCIÓN DEL TENOR ÓPTIMO DEL LIGANTE

El tenor óptimo de ligante asfáltico se obtiene a partir de un contenido estimado teóricamente (P_{best}). Para cada contenido se fabrican probetas, donde sus resultados (densidades) se promedian para el análisis posterior.

Una vez que se obtienen las densidades para cada contenido asfáltico, se procede al análisis de los siguientes parámetros:

- Vacíos de aire (V_a): este parámetro es el más influyente en el comportamiento de la mezcla.
- Vacíos de Agregado Mineral (VAM): este parámetro indica si hay espacios en el agregado para alojar una cantidad de asfalto que sea suficiente de tal modo a que la mezcla sea durable. Este valor depende del tamaño máximo del agregado.
- Vacíos llenos de Asfalto (VFA): indica el porcentaje de VAM ocupado por el asfalto, este valor depende del tipo de tráfico.
- Proporción del polvo mineral: es la razón entre el contenido de vacíos y el contenido de asfalto efectivo.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

- Densidad: se especifica una densidad máxima en el Nivel Inicial y en el Nivel Final de la compactación giratoria, este parámetro está en función de la densidad máxima de la mezcla.

En la Figura 46 se muestran los criterios a los que se somete la mezcla durante el diseño Superpave.

Propiedad	Criterio
Vacios de aire (%)	4.0
VMA (%)	11.0-15.0 dependiendo del TM
VFA (%)	65-80 dependiendo del tráfico
Proporción de polvo	0.6-1.2
Densidad en N_{ini}	< 89% Dmm
Densidad en N_{max}	< 98% Dmm

Figura 46 - Criterio de Diseño Superpave.

Fuente: Guillermo Thenoux y Hector Carrillo [3]

2.6.3.4 EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

La acción del agua en las mezclas asfálticas es un factor a tener en cuenta debido a que ésta genera una pérdida de cohesión en la misma, por lo que se resalta la importancia del ensayo de Lottman, que permite conocer la relación de esfuerzos a tensión de las mezclas asfálticas saturadas, sumergidas y sin saturación, que permite determinar según (Sanchez, 1999, p.1) [23]:

- El daño potencial por humedad en mezclas asfálticas
- La compatibilidad asfalto-agregados
- Selección de la mejor alternativa de cemento asfáltico
- Cuando es necesario utilizar aditivos
- Cuál es la dosificación del aditivo necesario para optimizar su efectividad

Para asegurar un buen comportamiento de la mezcla debe haber una buena adhesión entre el asfalto y el agregado, por ende, este ensayo tiene la finalidad de evaluar que tan susceptible es la mezcla ante el efecto de la humedad.

2.6.4. WHEEL TRACKING TEST

Una vez determinado el contenido de ligante asfáltico, se debe ensayar la capacidad de la mezcla para soportar deformaciones permanentes provocadas por el tráfico. El ensayo de Wheel Tracking Test (WTT) simula el efecto del tránsito sobre el pavimento midiendo las deformaciones que sufre la mezcla asfáltica a través del tiempo bajo condiciones extremas. Las variables que afectan a la performance de los pavimentos definidas por este ensayo son:

- Temperatura
- Carga o presión que efectúa la rueda sobre las probetas de asfalto
- Longitud del recorrido de la rueda sobre la probeta
- Frecuencia del paso de la rueda, forma, dimensiones de los especímenes a ensayar y duración del ensayo, donde el ensayo puede ser finalizado al cumplirse cierto número de ciclos o bien cuando las probetas presentan una deformación mayor a la permitida en criterios de aceptación o rechazos establecidos.

El tránsito crea cargas cíclicas, y cada ciclo se realiza cierto trabajo para deformar la superficie del pavimento como una combinación de densificación y deformación por corte. La densificación implica una reducción del volumen del material, mientras que la deformación por corte involucra el flujo plástico del material con o sin cambios de volumen.

La deformación que se produce por densificación del material se relaciona con una depresión en la huella de circulación sin levantamiento lateral a los lados de la misma. Esta densificación se debe principalmente a que la mezcla tiene un porcentaje de vacíos excesivo o una inadecuada compactación durante la colocación siendo compactada bajo la acción de las cargas del tránsito. Lo que reproduce esta densificación es que resulta en ahuellamientos de leves a moderados.

El comportamiento al ahuellamiento se modela normalmente en tres etapas. En la Figura 47 se observa cómo se desarrollan las deformaciones permanentes en función de las repeticiones de carga en cada una de esas etapas.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

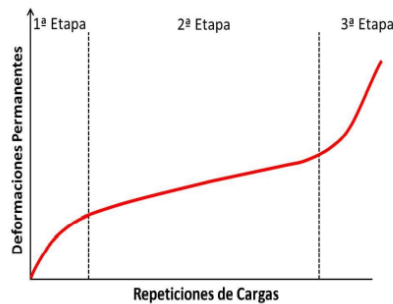


Figura 47 - Desarrollo de las deformaciones permanentes en función del número de cargas

Fuente: Materiales Viales Especiales Ing. Francisco Morea 2021 [24]

En la primera etapa corresponde a un rápido incremento del ahuellamiento por densificación con cambios de volumen. La velocidad de deformación en esta etapa va disminuyendo paulatinamente. Las deformaciones se presentan principalmente por la densificación.

En la segunda etapa las deformaciones son menores, la velocidad de deformación tiene una tendencia a ser constante. En esta etapa las deformaciones predominantes son las de corte que se incrementan paulatinamente. [25]

En la tercera etapa las deformaciones por corte alcanzan su límite y se produce el flujo de la mezcla, la velocidad de deformación y por tanto el ahuellamiento aumenta rápidamente hasta el colapso. En esta etapa las deformaciones se producen sin cambios de volumen. De las etapas descritas, la segunda resulta la más importante desde el punto de vista del diseño de una mezcla asfáltica ya que debe resistir a las deformaciones permanentes. El comportamiento de la mezcla en esta etapa definirá la susceptibilidad bajo condiciones climáticas y de carga extremas con deformaciones permanentes admisibles que no afecten el desempeño y seguridad de los vehículos. La primera etapa corresponde a un acomodamiento de la mezcla, si las deformaciones producidas en esta etapa son excesivas es producto de un mal diseño o falta de compactación (excesivo porcentaje de vacíos). La tercera etapa corresponde a la falla de la mezcla por falta de resistencia al corte.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

La configuración del ensayo consta básicamente de una rueda, rígida o neumática en algunos casos, la cual aplica una carga sobre la mezcla asfáltica a la vez que circula sobre ésta, mide o la deformación vertical que se produce en la probeta de forma cilíndrica cuando la misma está siendo ensayada.

Es necesario conocer dentro del diseño de una mezcla asfáltica si la misma es susceptible al ahuellamiento para poder corregir el problema a tiempo y no verlo en el pavimento ya construido, con los inconvenientes que ello ocasiona. [25]

2.6.4.1 EXPERIMENTO

El ensayo de WTT se utilizó para caracterizar el desempeño frente a las deformaciones permanentes de las mezclas asfálticas en condiciones controladas de laboratorio. El mismo cuenta con una cámara termostatazada que permite variar la temperatura y mantenerla estable durante la realización del ensayo. El equipo permite ser configurado de manera de realizar los ensayos de acuerdo con las normativas.

La rueda de ensayo, de goma maciza de 207 mm de diámetro y 47 mm de ancho, se desplaza sobre una muestra de concreto asfáltica con movimiento alternativo dentro de un recorrido de 230 mm. La temperatura del ensayo responde las temperaturas altas del pavimento Figura 48.

Durante el ensayo se miden las deformaciones permanentes producidas en la mezcla asfáltica en intervalos de 1 min por medio de adquisición electrónica a través de un LVDT (transductor de desplazamiento lineal variable). Cada dato de deformación permanente es resultado de un promedio de 25 mediciones realizadas en la huella de circulación en los 100 mm centrales de la probeta.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



Figura 48 - Equipo de Wheel Tracking Test y detalles de la configuración para cada metodología.

Fuente: Elaboración Propia

En la siguiente Tabla 5 se presentan las principales características de las normas más utilizadas en el ensayo de Wheel Tracking Test.

A partir de las mediciones de deformaciones en la mezcla se gráfica la curva de deformaciones permanentes (ϵ_p) en función del número de pasadas en escala doble logarítmica. Los datos se ajustaron al modelo potencial que indica la ecuación 1 para el análisis de datos.

$$\epsilon_p = a * N^b \dots \text{ecuación 1}$$

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Donde ϵ_p son las deformaciones permanentes, N es el número de pasadas, a y b las constantes de ajuste al modelo. Es importante destacar que tanto la Velocidad de deformación (V_d), como la WTS definen la tasa de crecimiento de la profundidad de huella a lo largo del tiempo.

Tabla 5 - Principales características de las metodologías de ensayo WTT utilizadas.

Tabla 2. Principales características de las metodologías de ensayo de WTT utilizadas.

	BS 598-110	CEN 12697-22
Carga aplicada	520 N	700 N
Tiempo de ensayo	2 horas	6,5 horas
Frecuencia de carga	21 ciclos/min	26,5 ciclos/min
Parámetros calculados	-Velocidad de deformación $V_d = \frac{D_{120} - D_{105}}{15 \text{ min.}} \left[\frac{\mu m}{\text{min}} \right]$ D_{120} y D_{105} : deformaciones para 120 y 105 minutos.	-Wheel Tracking Slope $WTS = \frac{D_{10000} - D_{5000}}{5} \left[\frac{mm}{10^3 \text{ ciclos}} \right]$ D_{10000} y D_{5000} : deformaciones para 10000 y 5000 ciclos de carga. - Proportional Ruth Depth $PRD = \frac{D_{10000}}{\text{Espesor}} [\%]$

Fuente: Análisis Del Comportamiento al Ahuellamiento de diferentes mezclas en Ensayos De Rueda Cargada Según Normas Bs 598-110 y EN 12697-22.

Estos parámetros se relacionan con la resistencia al ahuellamiento en mezcla y debieran ser comparables entre sí, los valores asociados a este ensayo se observan en la Tabla 6, como así también los valores correspondientes a la clasificación por transito son observados en la Tabla 7.

Las diferentes configuraciones (carga, tiempo de ensayo y parámetros de cálculo) manifiestan un mismo comportamiento de maneras diferentes. Es por ello que resulta necesario un análisis comparativo de los resultados para unificar los criterios o poder cotejar los resultados a fines de generar una futura especificación paraguaya de WTT.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Tabla 6 - Valores de WTT a ser cumplidos

EVALUACION DE LA RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO "WHEEL TRACKING TEST" (NORMA EN 12697-22 - PROCEDIMIENTO B)				
Pendiente Media de Deformación (WTSaire) [mm/1000 ciclos de carga] en el intervalo de 5000 a 10000 ciclos y Profundidad Media de la Huella (PRD) [%]				
Tipo de capa	Clasificación por tránsito			
	T1	T2	T3	T4
Rodamiento	WTSaire \leq 0,08	WTSaire \leq 0,10	WTSaire \leq 0,12	WTSaire \leq 0,15
	PRD \leq 5	PRD \leq 8	PRD \leq 10	PRD \leq 10
Base	WTSaire \leq 0,10	WTSaire \leq 0,12	WTSaire \leq 0,15	WTSaire \leq 0,15
	PRD \leq 8	PRD \leq 10	PRD \leq 10	PRD \leq 12

Fuente: DNV, 2017. [26]

Tabla 7 - Clasificación por tránsito

	Clasificación por tránsito			
	T1	T2	T3	T4
Indice de tránsito (IT)	≥ 1500	800-1499	200-799	≤ 199

Fuente: DNV, 2017 [26]

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE ENSAYOS

3.1. CONSIDERACIONES Y VARIABLES DEL PROYECTO

El objetivo de este capítulo es diseñar una mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall, variando el método de compactación, para ello los materiales a utilizar son CAP modificado con polímero tipo AM3 teniendo como guía el Manual de Carreteras del Paraguay, para luego evaluar su desempeño ante las deformaciones permanentes, por medio del Wheel Tracking Test.

Los agregados utilizados para el diseño de la mezcla asfáltica fueron proveídos por la Cantera Consorcio Contec – Caapucú, y los ligantes asfálticos por la empresa “Almacenamiento Y Distribución De Asfaltos S.A” (ALDIA).

Seguidamente, se describen los materiales utilizados, el procedimiento para la caracterización de las muestras, y los ensayos realizados de acuerdo con el método de diseño aplicado.

3.2. MATERIALES

3.2.1. AGREGADOS

Los agregados utilizados en la pavimentación son rocas de procedencia graníticas/dioríticas que se presentan en forma de batolitos (cuerpos graníticos de grandes volúmenes) de coloración gris muy oscura, se encuentran en la región oriental de nuestro país, localidad de Caapucú.

La composición mineralógica natural de los granitos/dioritos están representadas por: Plagioclasas, biotita, horblenda, cuarzo y feldespato potásico siendo que el porcentaje de ocurrencia en el macizo rocoso puede variar.

De acuerdo con la literatura geológica las rocas graníticas/dioritas son porfiríticas (granulares) y mineralógicamente están compuestas de:

- cuarzo entre 20 a 40%
- feldespatos potásicos, plagioclasas entre 50 a 70% -minerales hierro magnesiano entre 5 y 25%

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

- biotitas y hornblenda en pequeñas cantidades < 5% y los minerales accesorios como la magnetita, titanita, zirconio y granada.

En la Figura 49 se observa la disposición de los minerales que conforman la masa del granito/diorito



Figura 49 - Fase de quiebre del bloque del granito/diorito.

Fuente: Informe Geológico Y Geotécnico, Consorcio Contec.

Los agregados para este estudio se clasificaron partir de la trituración de las rocas, los mismos fueron utilizados de acuerdo con los cortes granulométricos de producción del Consorcio CONTEC.

A continuación, en la Tabla 8 se presenta un resumen de los ensayos de los agregados pétreos tanto finos como gruesos y así también del relleno mineral filler.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Ensayo	Seccion del Manual de Carreteras	Norma Utilizada	UM	Resultados	Exigencias	Anexos
Coefficiente de desgaste de los Angeles	6.2.5.11	IRAM 1532	%	15.7	≤ 25%	7.1.1
Plasticidad de la fraccion que pasa el tamiz 425 μm	6.1.3.5	IRAM 10501	NP	NP	NP	7.1.2
Relación vía seca – vía humedad de la fracción que pasa el tamiz IRAM 75 μm	6.1.3.5	VN E 7 - 65	%	0.0	Solo si el pasante del tamiz ASTM 0,075 vía húmeda es mayor del 5 %	7.1.3
Gravedad Especifica Bulk $Gsb= A/[B-C]$	6.2.5.19	IRAM 1533	g/cm ³	2.652	-	7.1.4
Gravedad especifica saturada Superficie Seca $Gss= B/[B-C]$	6.2.5.19	IRAM 1533	g/cm ³	2.643	-	7.1.4
Gravedad especifica aparente $Gsa= A/[A-$	6.2.5.19	IRAM 1533	g/cm ³	2.652	-	7.1.4
Absorcion	6.2.5.19	IRAM 1533	%	0.21	≤ 1.2%	7.1.4
Durabilidad por ataque de sulfatos de sodio	6.2.5.16	IRAM 1525	%	0.90	≤ 10%	7.1.5
Indice de Lajas	6.2.5.3	IRAM 1687 - 1	%	18.9%	≤ 25%	7.1.6
Indice de Elongacion	6.2.5.3	IRAM 1687 - 1	%	19.3%	≤ 25%	7.1.6
Micro Deval	6.2.5.22	IRAM 1762	%	2%	≤ 20%	7.1.7
Polvo Adherido	6.2.7.1	IRAM 1883	ml	1.0%	≤ 1.2%	7.1.8
Cubicidad	6.2.5.8	IRAM 1681	%	0.92%		7.1.9
Adherencia Ligante y agregado	6.2.7.1	IRAM 6842	%	97%	≥ 95%	7.1.10
Caras Fracturadas	6.3.1.18	IRAM 1851	%	99.7%	100%	7.1.11

Tabla 8 - Ensayos Agregados Gruesos de tamaño (1" -3/4").

Fuente: Elaboración Propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Ensayo	Seccion del Manual de Carreteras	Norma Utilizada	UM	Resultados	Exigencias	Anexos
Coefficiente de desgaste de los Angeles	6.2.5.11	IRAM 1532	%	15.7	≤ 25%	7.1.1
Plasticidad de la fraccion que pasa el tamiz 425 µm	6.1.3.5	IRAM 10501	NP	NP	NP	7.1.2
Relación vía seca – vía humedad de la fracción que pasa el tamiz IRAM 75 µm	6.1.3.5	VN E 7 - 65	%	0.0	Solo si el pasante del tamiz ASTM 0,075 vía húmeda es mayor del 5 %	7.1.3
Gravedad Especifica Bulk $Gsb= A/[B-C]$	6.2.5.19	IRAM 1533	g/cm ³	2.605	-	7.1.4
Gravedad especifica saturada Supeficie Seca $Gssss= B/[B-C]$	6.2.5.19	IRAM 1533	g/cm ³	2.612	-	7.1.4
Gravedad especifica aparente $Gsa= A/[A-C]$	6.2.5.19	IRAM 1533	g/cm ³	2.624	-	7.1.4
Absorcion	6.2.5.19	IRAM 1533	%	0.27	≤ 1.2%	7.1.4
Durabilidad por ataque de sulfatos de sodio	6.2.5.16	IRAM 1525	%	0.90	≤ 10%	7.1.5
Indice de Lajas	6.2.5.3	IRAM 1687 - 1	%	19.2%	≤ 25%	7.1.6
Indice de Elongacion	6.2.5.3	IRAM 1687 - 1	%	19.9%	≤ 25%	7.1.6
Micro Deval	6.2.5.22	IRAM 1762	%	5%	≤ 20%	7.1.7
Polvo Adherido	6.2.7.1	IRAM 1883	ml	1.2%	≤ 1.2%	7.1.8
Cubicidad	6.2.5.8	IRAM 1681	%	0.92%	-	7.1.9
Caras Fracturadas	6.3.1.18	IRAM 1851	%	99.7%	100%	7.1.11

Tabla 9 - Ensayos Agregados Intermedios de tamaño (3/4" – 1/4").

Fuente: Elaboración Propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Ensayo	Seccion del Manual de Carreteras	Norma Utilizada	UM	Resultados	Exigencias	Anexos
Plasticidad de la fraccion que pasa el tamiz 425 μm	6.1.3.5	IRAM 10501	NP	NP	NP	7.1.2
Gravedad Especifica Bulk $G_{sb} = A/[B-C]$	6.2.5.19	IRAM 1533	g/cm ³	2.553	-	7.1.4
Gravedad especifica saturada Supeficie Seca $G_{ss} = B/[B-C]$	6.2.5.19	IRAM 1533	g/cm ³	2.579	-	7.1.4
Gravedad especifica aparente $G_{sa} = A/[A-C]$	6.2.5.19	IRAM 1533	g/cm ³	2.621	-	7.1.4
Absorcion	6.2.5.19	IRAM 1533	%	1.02	$\leq 1.2\%$	7.1.4
Durabilidad por ataque de sulfatos de sodio	6.2.5.16	IRAM 1525	%	0.90	$\leq 10\%$	7.1.5
Equivalente de Arena	6.2.5.9	IRAM 1682	%	74%	$\geq 50\%$	7.1.11
Concentraci3n Critica	INV E - 225 -13	IRAM 1682	%	1.0%	$\leq 1.0\%$	7.1.12
Gravedad Especifica del relleno mineral			g/cm ³	2.267	-	7.1.4

Tabla 10 - Ensayos Agregados Finos de tamaño ($\frac{1}{4}$ " - 0) y el filler.

Fuente: Elaboraci3n Propia

3.2.2. CEMENTO ASFÁLTICO

El cemento asfáltico utilizado en este trabajo corresponde a un asfalto modificado con polímero tipo AM3. Todos los ensayos realizados en este trabajo final de grado fueron realizados con el mismo ligante asfáltico, el mismo fue proveído por ALDIA, los mismos, fueron separados luego de encontrarse en un estado fluido, en becker's de vidrio de borosilicato, y jarras de acero inoxidable de manera a evitar sobrecalentamientos a la hora de ser aplicados en la mezcla asfáltica, posteriormente se procedió a realizar los ensayos de caracterizaci3n del cemento asfáltico, como se puede observar en la Tabla 11.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Ensayo	Tipo de CAP	Seccion del Manual de Carreteras	Norma Utilizada	UM	Resultados	Minimo	Maximo	Anexo
Penetracion a 25°C	AM3	7.2.1.1.1 Penetracion a 25°C	IRAM 6576	mm	60.0	50	80	7.2.1
Punto de Inflamacion	AM3	7.2.1.1.2 Punto de Inflamacion	IRAM 6555	°C	300.0	-	-	7.2.2
Punto de Fulgor	AM3	7.2.1.1.2 Punto de Fulgor	IRAM 6555	°C	288.0	235.0	-	7.2.2
Punto de ablandamiento	AM3	7.2.1.1.3 Punto de ablandamiento	IRAM 115	°C	71.0	65.0	-	7.2.3
Viscosidad Rotacional Brookfield a 135°C	AM3	7.2.1.1.5 Viscosidad de	IRAM 6836	cP	1,540	-	3,000	7.2.4
Viscosidad Rotacional Brookfield a 155°C	AM3	7.2.1.1.5 Viscosidad de	IRAM 6836	cP	690	-	2,000	7.2.4
Viscosidad Rotacional Brookfield a 177°C	AM3	7.2.1.1.5 Viscosidad de	IRAM 6836	cP	320	-	1,000	7.2.4
Peso Especifico	AM3	7.2.1.1.4 Peso Especifico	ASTM D71-94	g/cm3	1.009	-	-	7.2.5
Ensayo de la Mancha	AM3	7.2.1.1.6 Ensayo de la Mancha	IRAM 6594		Negativo	-	-	7.2.6
Ductilidad a 25°C	AM3	7.2.1.1.8 Ductilidad	IRAM 6579	cm	> 100	75	-	7.2.7
Recuperacion Elastica Torsional a 25°C	AM3	7.2.1.1.7 Recuperación elástica torsional	IRAM 6830	%	73	70	-	7.2.8
Sobre el Residuo Asfáltico								
Variacion de Masa %	AM3	7.2.1.2.1.1 Variación de Masa	IRAM 6582	%	0.7843	-	1	7.2.9
Penetracion a 25°C	AM3	7.2.1.2.1.2 Penetración	IRAM 6576	mm	42	32.5	52	7.2.10
Punto de ablandamiento	AM3	7.2.1.2.1.3 Punto de ablandamiento	IRAM 115	°C	80	65.5	80.5	7.2.11

Tabla 11 - Resumen de ensayos sobre el cemento asfáltico

Fuente: Elaboración Propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Los rangos de viscosidad realizados al cemento asfáltico , para mezclar y compactar no aplican para asfaltos modificados, esto debido a que el comportamiento no-newtoniano de los asfaltos modificados provoca que resulten temperaturas muy altas, en la práctica está comprobado que se requieren temperaturas menores para poder mezclar y compactar adecuadamente, esto indica que su viscosidad se ve afectada por el esfuerzo y la velocidad de corte, esto quiere decir que la viscosidad del asfalto modificado puede ser muy diferente si se le aplica una velocidad de corte baja o alta. Esto lleva a que las temperaturas de mezclado y de compactación para asfaltos modificados sean recomendadas por el mismo proveedor del asfalto modificado o por el proveedor del polímero. Para este caso, de acuerdo con el fabricante la temperatura de mezclado recomendada se encuentra entre 170°C y 175 °C, y para la compactación entre 155 °C y 160 °C.

3.3 DISEÑO DE LA MEZCLA

3.3.1 DOSIFICACIÓN

Para la dosificación de las cantidades de material primeramente fue necesaria la realización de las granulometrías individuales de los mismos, siguiendo las normativas expuestas en el Manual de Carreteras, en la Tabla 12 se observa el análisis granulométrico.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

AGREGADOS A COMBINAR:					
AGREGADO 1	GRAVA TRITURADA 25 - 19 mm				
AGREGADO 2	GRAVA TRITURADA 19 - 12,5 mm				
AGREGADO 3	GRAVA TRITURADA 6,3 - 0 mm				
AGREGADO 4	CAL HIDRATADA				

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
AGREGADO MALLA ASTM	ABERTURA	(PORCENTAJES PASANTES)			
	mm	25-19	19-12,5	6,3-0	Cal
1"	25,000	100,0	100,0	100,0	100,0
7/8"	22,000	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,000	95,4	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,500	21,3	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,500	3,5	70,0	100,0	100,0
1/4"	6,300	1,4	21,2	100,0	100,0
Nº4	4,750	1,1	6,0	95,2	100,0
Nº8	2,360	0,8	1,4	68,7	100,0
Nº10	2,000	0,0	1,1	62,5	100,0
Nº16	1,180	0,0	0,0	44,4	100,0
Nº20	0,850	0,0	0,0	36,6	100,0
Nº30	0,600	0,0	0,0	29,7	100,0
Nº40	0,425	0,0	0,0	24,8	100,0
Nº50	0,300	0,0	0,0	18,5	100,0
Nº100	0,150	0,0	0,0	11,7	97,0
Nº200	0,075	0,0	0,0	7,8	89,1

Tabla 12 - Granulometría Individual de los agregados.

Fuente: Elaboración propia

A partir de estos datos fueron realizados los siguientes gráficos semilogarítmicos de las granulometrías individuales de los agregados pétreos utilizados, como se observan en las siguientes tablas

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

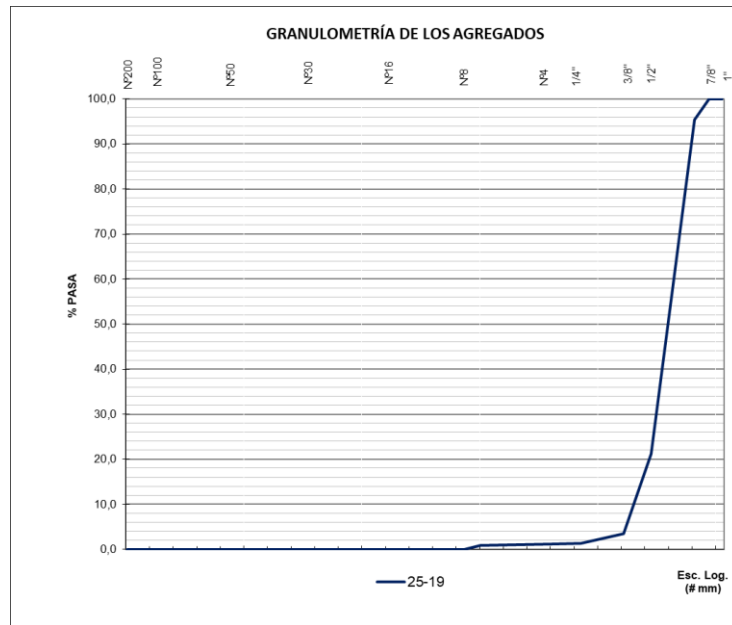


Tabla 13 - Granulometría Individual de la 4ta

Fuente: Elaboración propia



Tabla 14 - Granulometría Individual de la 5ta

Fuente: Elaboración propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



Tabla 15 - Granulometría Individual de la 6ta

Fuente: Elaboración propia



Tabla 16 - Granulometría Individual del Filler - Cal

Fuente: Elaboración propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

3.3.2 CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS

La composición de la mezcla de los agregados, dependiendo del tipo de esqueleto granular considerado, debe estar comprendida dentro de los límites establecidos en los husos granulométricos definidos en la Tabla 17

HUSOS GRANULOMÉTRICOS DEL ESQUELETO GRANULAR DE LOS CAS D Y CAS D		
Tamices	Porcentaje en peso que pasa (1)	
	12 (2)	19 (2)
25 mm (1")	---	100
19 mm (¾")	100	83-100
12,5 mm (½")	80-95	---
9,5 mm (3/8")	72-87	60-75
4,75 mm (N° 4)	47-65	42-60
2,36 mm (N° 8)	30-50	29-47
600 µm (N° 30)	16-30	15-29
300 µm (N° 50)	12-23	11-21
75 µm (N°200)	5-8	4-8

Tabla 17 - Husos Granulométricos del esqueleto Granular

Fuente: Manual de Carreteras del Paraguay edición 2019 [13]

Las características del agregado como la calidad, graduación, tamaño máximo nominal, que se emplearon en la elaboración de la curva granulométrica de este trabajo, resultaron un agregado de tamaño máximo nominal de 19 mm, se entiende por tamaño máximo nominal a la malla superior que retiene más del 10%, por ende, se utilizó la faja de 19 como se observa en la tabla anterior. La combinación tomada se presenta en la Tabla 18

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

CURVA GRANULOMETRICA DE LA COMBINACION DE AGREGADOS											
ESPECIFICACIONES DE OBRA											
AGREGADO MALLA ASTM	Abertura mm	Porcentaje Pasa Acumulado				% Pasa		FAJA CAC D-20			Verificación
		25-19	19-6	6-0	Cal	Acumulado	Combinación	LIMITE INF		LIMITE SUP	
1"	25	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	-	100	ok
3/4"	19	95,4	100,0	100,0	100,0	99	83	83	-	100	ok
3/8"	9,5	3,5	70,0	100,0	100,0	70	60	60	-	75	ok
Nº4	4,75	1,1	6,0	95,2	100,0	56	45	45	-	60	ok
Nº8	2,36	0,8	1,4	68,7	100,0	40	33	33	-	47	ok
Nº30	0,600	0,0	0,0	29,7	100,0	18	17	17	-	29	ok
Nº50	0,300	0,0	0,0	24,8	100,0	16	12	12	-	21	ok
Nº200	0,075	0,0	0,0	11,7	89,1	8	5	5	-	8	ok
% Mat.		26,0	17,0	55,0	2,0	100					

Tabla 18 - Combinación de Agregados

Fuente: Elaboración propia

Una vez verificados los límites establecidos en el Huso granulométrico, se presenta en la siguiente Tabla 19 la curva resultante de la combinación de agregados.

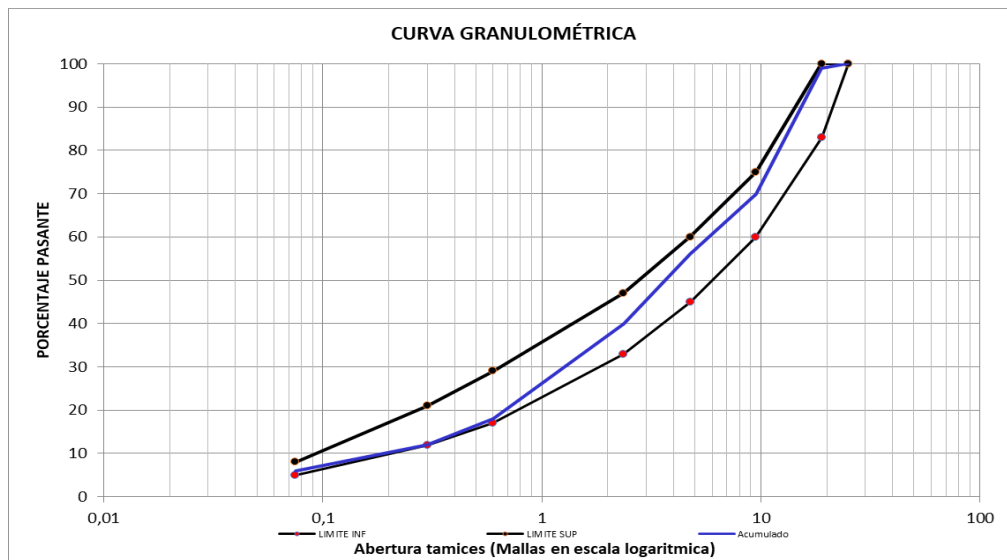


Tabla 19 - Curva granulométrica de la combinación de agregados y límites de la Faja.

Fuente: Elaboración propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

3.3.3 MÉTODO MARSHALL

El método de Diseño Marshall tiene como finalidad obtener un contenido óptimo de asfalto con la combinación adecuada de agregados minerales que permita brindarle a la mezcla asfáltica resultante una serie de características físicas y de resistencia que se establecen en el Manual de Carreteras del Paraguay.

De acuerdo con el criterio establecido por el Instituto de Asfalto (USA) referente al diseño Marshall, la determinación del contenido de asfalto óptimo se basa fundamentalmente en los vacíos de la mezcla. [3]

Una vez seleccionada la estructura del agregado de diseño y el contenido asfáltico óptimo, se conforma la mezcla asfáltica, de manera que esta combinación asegure soportar los cambios volumétricos ocasionados por la densificación al efecto del tráfico. Además, de no ser susceptible a efectos climáticos y el paso de las cargas de tránsito que circularán sobre la carpeta asfáltica.

En la Tabla 20 pueden observarse los requisitos del Método Marshall para la dosificación de mezclas.

Parámetro		Exigencia				
Ensayo Marshall (IRAM 6845)	Nº golpes por cara (1)	75				
	Estabilidad	> 10 kN				
	Relación Estabilidad-Fluencia (2)	2,5 - 4,5 kN/mm				
	Vacíos en la mezcla (3)	3 - 5 %.				
	Vacíos del agregado mineral (VAM) (3)	Tamaño máximo nominal del agregado pétreo		VAM		
		TMN 19 mm	≥ 14 %			
		TMN 12 mm	≥ 15 %			
	Relación Betún-Vacíos (RBV)	..				
		Tipo de capa	RBV (%)			
			Clasificación por tránsito			
T1			T2	T3	T4	
Rodamiento	65 - 75	65 - 75	65 - 78	65 - 78		
Base	68 - 78	68 - 78	70 - 80	70 - 80		
..						

Tabla 20 - Requisitos de Marshall para Dosificación de mezclas

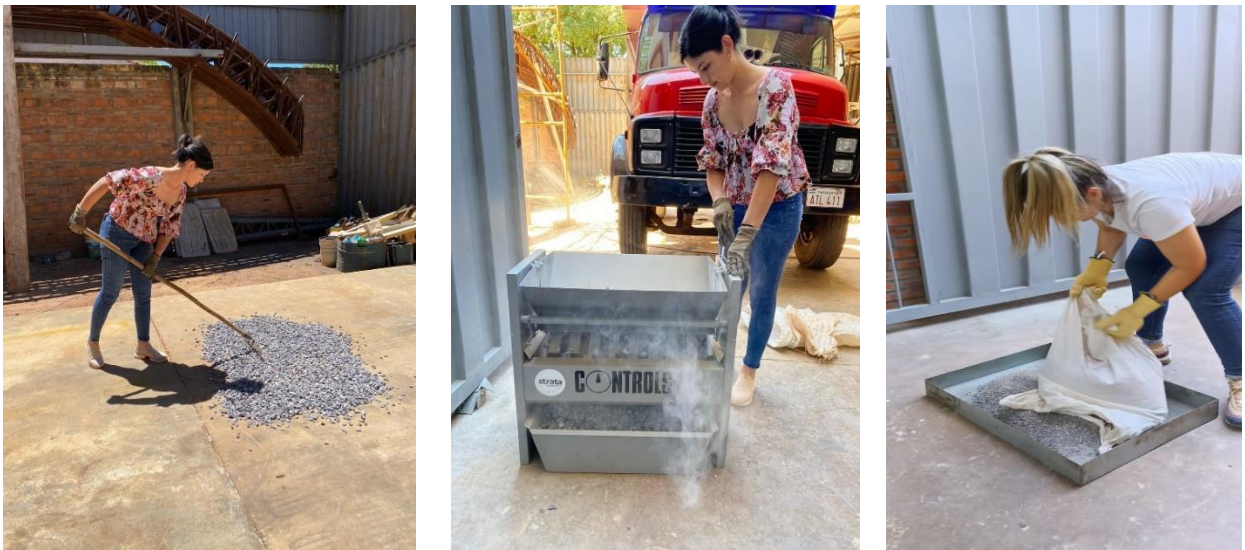
Fuente: Manual de Carreteras del Paraguay [13]

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

3.3.3.1. PREPARACIÓN DEL AGREGADO

3.3.3.1.1. SECADO DE LOS AGREGADOS

Los agregados pétreos seleccionados deben estar libres de humedad, por ese motivo se deben reunir las muestras de los agregados, cuartearlas, y colocar los agregados en bandejas, se calientan en el horno a una temperatura de 110°C, hasta peso constante, como se observa en la Figura 50.



(a)

(b)

(c)

Figura 50 - (a) Secado del Material Pétreo. (b) Cuarteado del agregado Pétreo. (c) Agregados colocados en bandejas, Laboratorio Strata

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.1.2. SEPARACIÓN DE LOS AGREGADOS

Posterior al secado y cuarteo de los agregados, se proceden a la separación por retenido de los tamices, dentro de los parámetros de los husos granulométricos optados para el análisis a fin de poder obtener una mezcla representativa, incluyendo el relleno mineral (cal). Se obtuvieron los pesos respectivos de cada retenido, para cada porcentaje de asfalto a probar, de acuerdo con las siguientes tablas.

Para el conjunto de probetas 3.500 gr:

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

a- Con 4.5 % de cemento asfáltico

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
DOSIFICACIÓN PARA MOLDEOS DE PROBETAS

TESIS: Ana Julio - Liz Goiriz
TEMA: Método de compactación
CANTERA: Cantera Caapucú
FECHA: 20/1/2022



Agregado Tipo: 4ta % de Asfalto: 4.50 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz	
1"	100.0		3,500	$\frac{100 - 4.5 \times 26}{100}$	24.83						
3/4"	95.4	4.6				0.0462	x	0.248	x	3,500	40.15
3/8"	3.5	91.9				0.9187	x	0.248	x	3,500	798.44
4	1.1	2.4				0.0238	x	0.248	x	3,500	20.70
8	0.8	0.3				0.0031	x	0.248	x	3,500	2.65
Fondo		0.8				0.0082	x	0.248	x	3,500	7.10
										869.05	

Agregado Tipo: 5ta % de Asfalto: 4.5 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz	
3/4"	100.0		3,500	$\frac{100 - 4.5 \times 17}{100}$	16.24						
3/8"	70.0	30.0				0.2996	x	0.162	x	3,500	170.25
4	6.0	64.1				0.6407	x	0.162	x	3,500	364.09
8	1.4	4.6				0.046	x	0.162	x	3,500	26.15
Fondo		1.4				0.0136	x	0.162	x	3,500	7.74
										568.23	

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Para el conjunto de probetas 3.500 gr:

b- Con 5.0 % de cemento asfáltico

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

DOSIFICACIÓN PARA MOLDEOS DE PROBETAS

TESIS: Ana Julio - Liz Goiriz
TEMA: Método de compactación
CANTERA: Cantera Caapucú
FECHA: 20/1/2022



Agregado Tipo: 4ta % de Asfalto: 5.00 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
1"	100.0		3,500	$\frac{100 - 5.0 \times 26}{100}$	24.70		
3/4"	95.4	4.6				0.0462 x 0.247 x 3,500	39.94
3/8"	3.5	91.9				0.9187 x 0.247 x 3,500	794.26
4	1.1	2.4				0.0238 x 0.247 x 3,500	20.60
8	0.8	0.3				0.0031 x 0.247 x 3,500	2.64
Fondo		0.8				0.0082 x 0.247 x 3,500	7.07
							864.50

Agregado Tipo: 5ta % de Asfalto: 5.0 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
3/4"	100.0		3,500	$\frac{100 - 5.0 \times 17}{100}$	16.15		
3/8"	70.0	30.0				0.2996 x 0.162 x 3,500	169.36
4	6.0	64.1				0.6407 x 0.162 x 3,500	362.18
8	1.4	4.6				0.046 x 0.162 x 3,500	26.01
Fondo		1.4				0.0136 x 0.162 x 3,500	7.70
							565.25

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Agregado Tipo: 6ta			% de Asfalto: 5.0 %				
Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
3/4"	100.0		3,500	$\frac{100 - 5.0 \times 55}{100}$	52.25		
3/8"	100.0	0.0				0 x 0.523 x 3,500	0.00
4	95.2	4.8				0.0483 x 0.523 x 3,500	88.37
8	68.7	26.4				0.2644 x 0.523 x 3,500	483.45
Fondo		68.7				0.6873 x 0.523 x 3,500	1,256.93
							1,828.75

Agregado Tipo: Cal			% de Asfalto: 5.0 %				
Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
				$\frac{100 - 5.0 \times 2}{100}$	1.90	0.019	66.50

Peso del CAP 5.0 %

C. A. P. modificado con polimero tipo am3			% de Asfalto: 5,0 %				
			3.500	5,0	0,050	x 3.500	175,00
							3.500,00

Tabla 22 - Separación de agregados por retenido para 5.0 % de Asfalto Fuente:
Elaboración Propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

c- Con 5.5% de cemento asfáltico

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

DOSIFICACIÓN PARA MOLDEOS DE PROBETAS

TESIS: Ana Julio - Liz Goiriz
TEMA: Método de compactación
CANTERA: Cantera Caapucú
FECHA: 20/1/2022



Agregado Tipo: 4ta % de Asfalto: 5.50 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz	
1"	100.0		3,500	$\frac{100 - 5.5 \times 26}{100}$	24.57						
3/4"	95.4	4.6				0.0462	x	0.246	x	3,500	39.73
3/8"	3.5	91.9				0.9187	x	0.246	x	3,500	790.08
4	1.1	2.4				0.0238	x	0.246	x	3,500	20.49
8	0.8	0.3				0.0031	x	0.246	x	3,500	2.63
Fondo		0.8				0.0082	x	0.246	x	3,500	7.03
										859.95	

Agregado Tipo: 5ta % de Asfalto: 5.5 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz	
3/4"	100.0		3,500	$\frac{100 - 5.5 \times 17}{100}$	16.07						
3/8"	70.0	30.0				0.2996	x	0.161	x	3,500	168.47
4	6.0	64.1				0.6407	x	0.161	x	3,500	360.27
8	1.4	4.6				0.046	x	0.161	x	3,500	25.87
Fondo		1.4				0.0136	x	0.161	x	3,500	7.66
										562.28	

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Agregado Tipo: 6ta % de Asfalto: 5.5 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
3/4"	100.0		3,500	$\frac{100 - 5.5 \times 55}{100}$	51.98		
3/8"	100.0	0.0				0 x 0.520 x 3,500	0.00
4	95.2	4.8				0.0483 x 0.520 x 3,500	87.90
8	68.7	26.4				0.2644 x 0.520 x 3,500	480.90
Fondo		68.7				0.6873 x 0.520 x 3,500	1,250.32
							1,819.13

Agregado Tipo: Cal % de Asfalto: 5.5 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
				$\frac{100 - 5.5 \times 2}{100}$	1.89	0.019	66.15

C. A. P. modificado con polimero tipo am3 % de Asfalto: 5,5 %

			3.500		5,5	0,055 x 3.500	192,50
					100,0		3.500,00

Tabla 23 - Separación de agregados por retenido para 5.5 % de Asfalto

Fuente: Elaboración Propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

c - Con 6.0 % de cemento asfáltico

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

DOSIFICACIÓN PARA MOLDEOS DE PROBETAS

TESIS: Ana Julio - Liz Goiriz
TEMA: Método de compactación
CANTERA: Cantera Caapucú
FECHA: 20/1/2022



Agregado Tipo: 4ta % de Asfalto: 6.00 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz	
1"	100.0		3,500	$\frac{100 - 6.0 \times 26}{100}$	24.44						
3/4"	95.4	4.6				0.0462	x	0.244	x	3,500	39.52
3/8"	3.5	91.9				0.9187	x	0.244	x	3,500	785.90
4	1.1	2.4				0.0238	x	0.244	x	3,500	20.38
8	0.8	0.3				0.0031	x	0.244	x	3,500	2.61
Fondo		0.8				0.0082	x	0.244	x	3,500	6.99
											855.40

Agregado Tipo: 5ta % de Asfalto: 6.0 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz	
3/4"	100.0		3,500	$\frac{100 - 6.0 \times 17}{100}$	15.98						
3/8"	70.0	30.0				0.2996	x	0.160	x	3,500	167.57
4	6.0	64.1				0.6407	x	0.160	x	3,500	358.37
8	1.4	4.6				0.046	x	0.160	x	3,500	25.74
Fondo		1.4				0.0136	x	0.160	x	3,500	7.62
											559.30

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Agregado Tipo: 6ta			% de Asfalto: 6.0 %				
Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
3/4"	100.0		3,500	$\frac{100 - 6.0 \times 55}{100}$	51.70		
3/8"	100.0	0.0				0 x 0.517 x 3,500	0.00
4	95.2	4.8				0.0483 x 0.517 x 3,500	87.44
8	68.7	26.4				0.2644 x 0.517 x 3,500	478.36
Fondo		68.7				0.6873 x 0.517 x 3,500	1,243.70
							1,809.50

Agregado Tipo: Cal			% de Asfalto: 6.0 %				
Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
				$\frac{100 - 6.0 \times 2}{100}$	1.88	0.019	65.80

C. A. P. modificado con polímero tipo am3			% de Asfalto: 6.0 %				
			3,500		6.0	0.060 x 3,500	210.00
							100.0
							3,500.00

Temperatura de mezclado 170 a 175 °C
Temperatura de compactación 155 a 160 °C

Tabla 24 - Separación de agregados por retenido para 6.0 % de Asfalto Fuente:
Elaboración Propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

d- Con 6.5 % de cemento asfáltico

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

DOSIFICACIÓN PARA MOLDEOS DE PROBETAS

TESIS: Ana Julio - Liz Goiriz
TEMA: Método de compactación
CANTERA: Cantera Caapucú
FECHA: 20/1/2022



Agregado Tipo: 4ta % de Asfalto: 6.50 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz	
1"	100.0		3,500	$\frac{100 - 6.5 \times 26}{100}$	24.31						
3/4"	95.4	4.6				0.0462	x	0.243	x	3,500	39.31
3/8"	3.5	91.9				0.9187	x	0.243	x	3,500	781.72
4	1.1	2.4				0.0238	x	0.243	x	3,500	20.27
8	0.8	0.3				0.0031	x	0.243	x	3,500	2.60
Fondo		0.8				0.0082	x	0.243	x	3,500	6.95
										850.85	

Agregado Tipo: 5ta % de Asfalto: 6.5 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz	
3/4"	100.0		3,500	$\frac{100 - 6.5 \times 17}{100}$	15.90						
3/8"	70.0	30.0				0.2996	x	0.159	x	3,500	166.68
4	6.0	64.1				0.6407	x	0.159	x	3,500	356.46
8	1.4	4.6				0.046	x	0.159	x	3,500	25.60
Fondo		1.4				0.0136	x	0.159	x	3,500	7.58
										556.33	

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Agregado Tipo:		6ta		% de Asfalto:		6.5		%			
Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz	
3/4"	100.0		3,500	$\frac{100 - 6.5 \times 55}{100}$	51.43						
3/8"	100.0	0.0				0	x	0.514	x	3,500	0.00
4	95.2	4.8				0.0483	x	0.514	x	3,500	86.97
8	68.7	26.4				0.2644	x	0.514	x	3,500	475.82
Fondo		68.7				0.6873	x	0.514	x	3,500	1,237.09
											1,799.88

Agregado Tipo:		Cal		% de Asfalto:		6.5		%		
Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz
				$\frac{100 - 6.5 \times 2}{100}$	1.87	0.019				65.45

C. A. P. modificado con polímero tipo am3				% de Asfalto:		6.5		%		
			3,500	6.5	0.065	x	3,500		227.50	
										100.0
										3,500.00

Tabla 25 - Separación de agregados por retenido para 6.5 % de Asfalto

Fuente: Elaboración Propia

3.3.3.1.3 PREPARACIÓN DE LOS AGREGADOS PARA LA COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA

Previamente a la elaboración de las probetas Marshall se procede a determinar las gravedades específicas de los materiales pétreos y del ligante asfáltico, como se observa en la Figura 51. Posteriormente a esta determinación se procede a secar el material pétreo grueso y fino colocándolo en el horno a una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$, para luego tamizar cada componente, cada uno de ellos en fracciones granulométricas delimitadas por pares de tamices.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



(a)



(b)



(c)

Figura 51 - (a) Gravedad Específica del agregado grueso e intermedio. (b) Gravedad Específica del agregado fino. (c) Tamizado de agregados, Laboratorio Strata

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.2 ELABORACIÓN DE PROBETAS MARSHALL

De acuerdo con las proporciones de cada componente que intervenga en la mezcla final, se determina las cantidades necesarias de cada agregado pétreo, de relleno mineral y de ligante asfáltico para la ejecución de la probeta, se procede a mezclar, colocar en los moldes y compactarlas, como se indica en la Sección 6.2.6.8. del Manual de Carreteras del Paraguay, para posteriormente poder realizar los ensayos requeridos. En la siguiente Figura 52 se puede apreciar el proceso para elaborar probetas Marshall.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

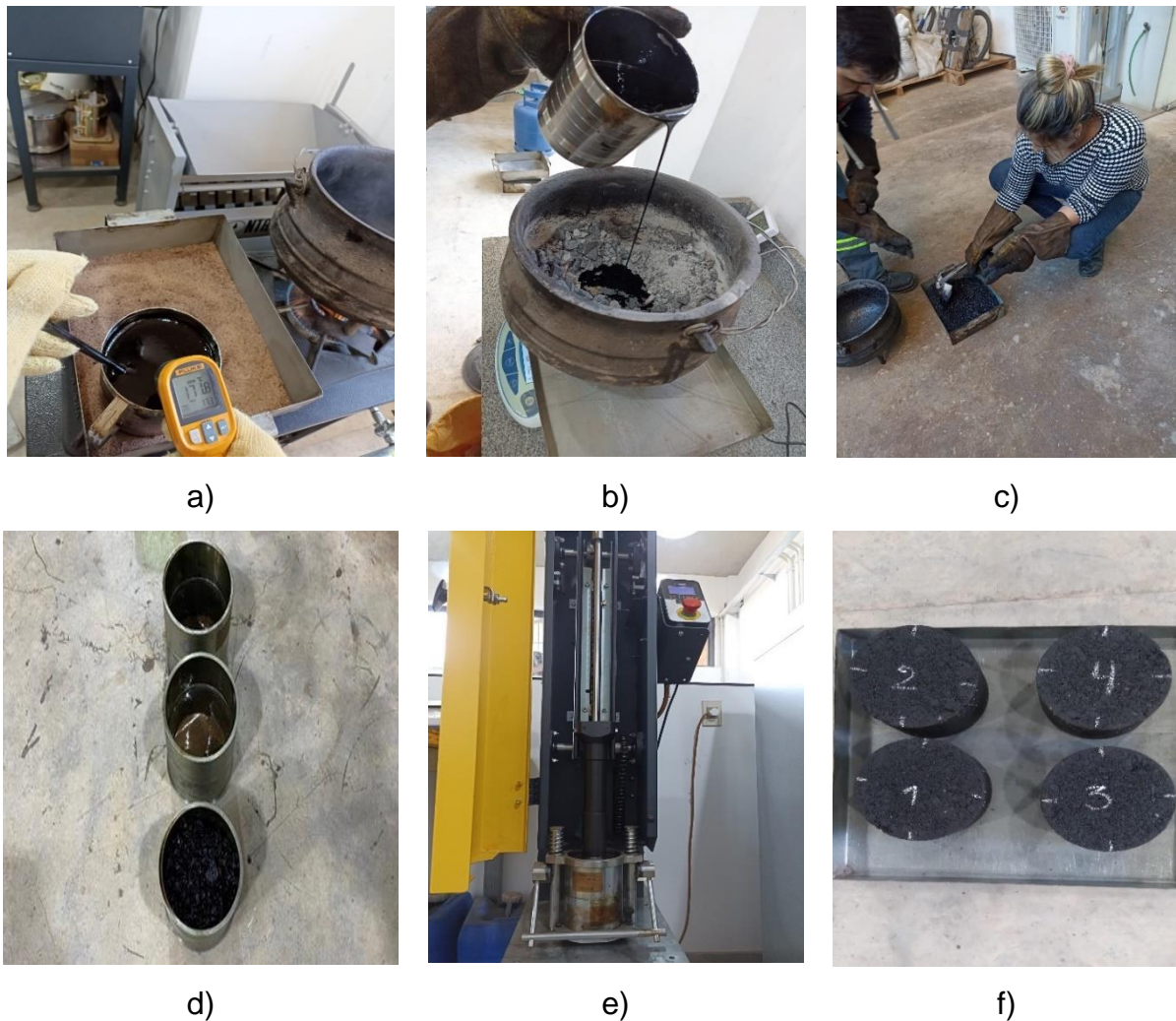


Figura 52 - a) Calentamiento del CAP AM3, b) Áridos para las probetas Marshall, c) Proceso de Mezclado, d) Moldeo de probetas, e) Martillo Marshall, f) Probetas Marshall.

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.2.1 DENSIDAD DE LAS PROBETAS COMPACTADAS

Una vez elaboradas las probetas y estas estén a temperatura ambiente, se determinan sus respectivos pesos específicos y vacíos mediante la sección 6.2.6.6 del Manual de Carreteras del Paraguay, también se determinan las alturas de cada probeta por medición directa mediante un calibre de 0.1 mm de aproximación. En la siguiente Figura 53 se pueden observar la determinación de los pesos específicos.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

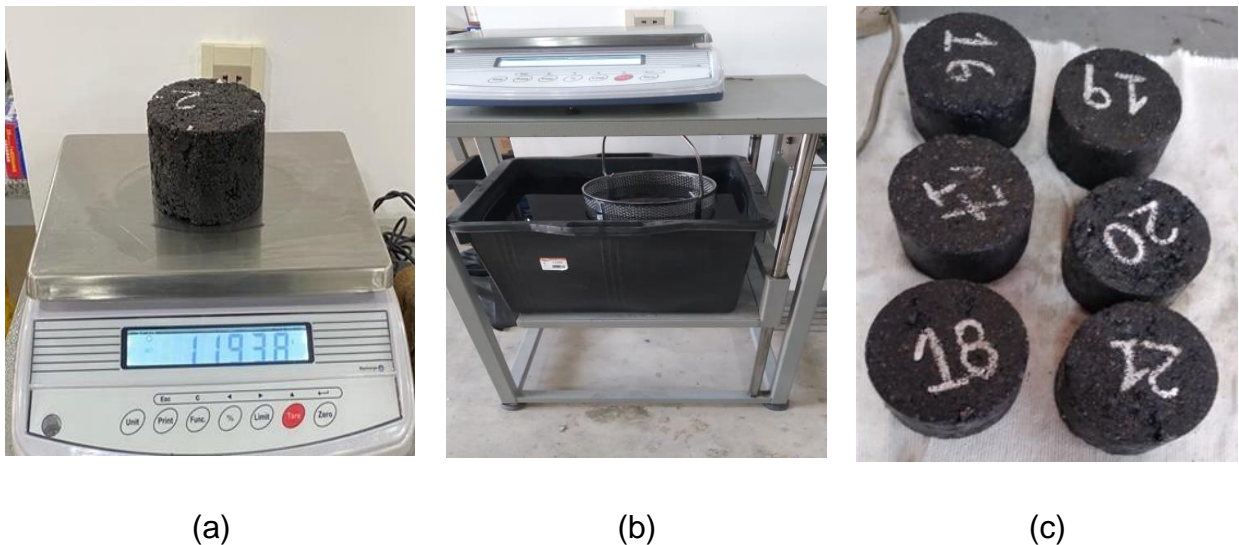


Figura 53 - (a) Peso seco, (b) Peso en agua, (c) Peso saturado superficialmente seco

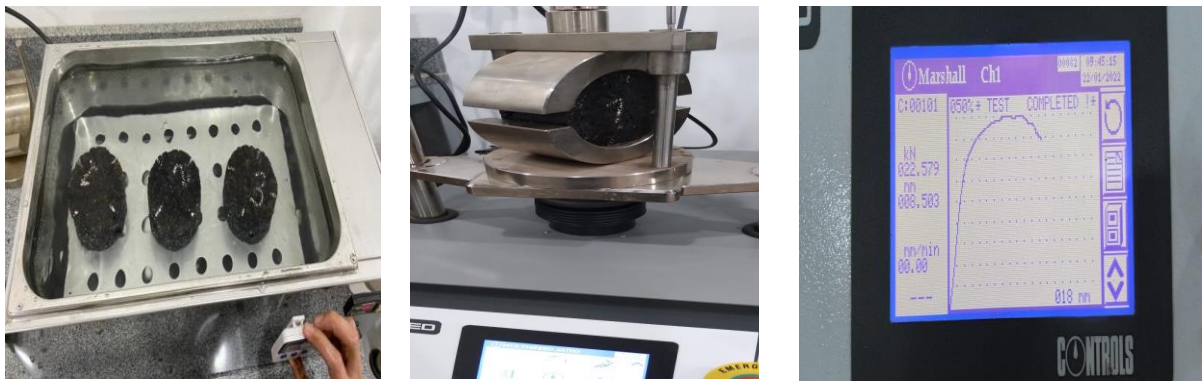
Fuente: Elaboración propia

3.3.3.2.2 ESTABILIDAD Y FLUENCIA

Este ensayo mecánico permite una aproximación sobre el desempeño de la mezcla elaborada. El ensayo de estabilidad corresponde a la máxima carga a la que es sometida un cuerpo, las probetas son sumergidas en un baño térmico a una temperatura de 60°C donde es sometida a una deformación diametral a una velocidad de 50.8 mm/minuto. Mientras que la fluencia es la medida de la deformación que experimenta la probeta desde el comienzo de la aplicación de la carga en el ensayo de estabilidad, hasta el instante de producirse la falla. Para estas mediciones se utilizó como guía la Sección 6.2.6.8. del Manual de Carreteras del Paraguay. [13]

En la siguiente Figura 54 se aprecia el proceso para determinar la estabilidad y fluencia de las probetas Marshall.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



(a)

(b)

(c)

Figura 54 - (a) Probetas sumergidas en el baño maría, (b) rotura de probeta, (c)

Curva Estabilidad – Fluencia

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.2.3 DENSIDAD TEÓRICA MÁXIMA DE LA MEZCLA (RICE)

La gravedad específica teórica máxima se calcula mediante la Norma AASTHO T 209, la determinación de su valor se emplea en el cálculo de los vacíos de la mezcla bituminosa no compactadas a 25°C. Para su determinación se utilizó como guía la Sección 6.2.6.5. del Manual de Carreteras del Paraguay. En las siguientes Figura 55 se puede observar el proceso de ensayo.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



(a)



(b)



(c)

Figura 55 - (a) Mezcla Cuarteada y desmenuzado, (b) Picnómetro más material más agua, (c) Agitado del material

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.3 ANÁLISIS DE DENSIDAD Y VACÍOS

Una vez terminados los ensayos anteriores se procede con el análisis de densidad y vacíos para cada serie de probetas. Este análisis tiene como finalidad determinar el porcentaje de vacíos de la mezcla compactada los vacíos de aire (V_a), el vacío de agregado mineral (VAM), los vacíos llenos de asfalto (VFA) y la Densidad Bulk de la mezcla compactada (G_{mb}).

3.3.4 ENSAYO LOTTMAN MODIFICADO

El ensayo Lottman modificado, también es un requisito del manual de carreteras, debido a que el mismo proporciona una medida de la pérdida de cohesión de una mezcla compactada como resultado de los efectos de saturación acelerada en agua, en ciclos de congelamiento y deshielo. Estos ensayos miden el comportamiento de la mezcla en toda su composición (árido fino, árido grueso y ligante). Esto permite predecir la susceptibilidad de desprendimiento de las mezclas asfálticas. [27]

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

En la siguiente Figura 56 se observan los requisitos para el ensayo Lottman Modificado.

Parámetro	Exigencia
Resistencia conservada mediante el ensayo Lottman modificado (ASTM D 4867 o AASHTO T 283)	> 80 %

Figura 56 - Requisitos del ensayo Lottman Modificado para la dosificación de mezclas

Fuente: Manual de Carreteras del Paraguay edición 2019 [13]

La siguiente Figura 57 se aprecia el equipo utilizado en el proceso del ensayo.

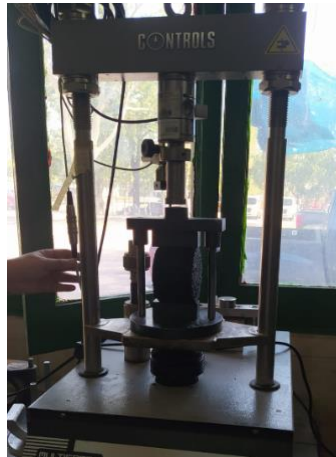


Figura 57 - Maquina para el ensayo de Lottman

Fuente: Elaboración Propia

3.3.5 COMPACTACIÓN GIRATORIA

La compactación de especímenes de una mezcla asfáltica en el compactador giratorio se diseñó con el fin de simular la densificación que se produce en el campo, en este caso el reacomodo de las partículas.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

3.3.6 PREPARACIÓN Y COMPACTACIÓN DE MUESTRAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE POR MEDIO DEL COMPACTADOR GIRATORIO

En laboratorio se procedió a preparar especímenes de prueba en los moldes de dimensiones 150 mm de diámetro, y posteriormente se sometió a compactación en diferentes ciclos de giros para determinar la gravedad específica bruta (Gmb).

3.3.7 EQUIPO Y HERRAMIENTAS

Equipos	Descripción
Compactador giratorio Figura 58	Electromecánico, capaz de girar a 30 ± 0.5 rpm y producir un ángulo de giro interno constante de $1.16 \pm 0.02^\circ$ durante el proceso de compactación.
Molde de acero	Diámetro interior de 149.9 a 150 mm, espesor mínimo de 7.5 mm y por lo menos 250 mm de altura, este también incluye una base para el molde y un plato circular
Balanza	Resolución de 0.1 g
Termómetro infrarrojo	Para evaluar la temperatura del asfalto y de los agregados
Horno	Para mantener las temperaturas correspondientes para el ensayo.
Discos de papel	De 150 mm de diámetro para el plato circular
Mezclador mecánico Figura 58	Utilizado para mezclar los agregados y el asfalto y a la vez estén acondicionados a la temperatura de ensayo.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



(a)



(b)

Figura 58 - (a) Compactador Giratorio Superpave, (b) Mezclador Bitumix – Laboratorio Strata

Fuente: Elaboración Propia

3.3.7 MÉTODO DE PRUEBA

3.3.7.1 PREPARACIÓN DEL EQUIPO

Calentar un horno a la temperatura de mezclado $\pm 3^{\circ}\text{C}$ y otro horno a la temperatura de compactación $\pm 3^{\circ}\text{C}$, colocar el molde en el horno a la temperatura de compactación y calentar los recipientes y accesorios que se van a utilizar

3.3.7.2 PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES

Se procedió a pesar y combinar los agregados también el asfalto de acuerdo con la proporción seleccionada en el ensayo de diseño de mezclas Método Marshall realizado anteriormente y que se puede observar en la siguiente Tabla 26

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

DOSIFICACIÓN PARA MOLDEOS DE PROBETAS

TESIS: Ana Julio - Liz Goiriz
TEMA: Método de compactación
CANTERA: Cantera Caapucú
FECHA: 20/1/2022



Agregado Tipo: 4ta % de Asfalto: 5.51 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar			Peso de Material por Tamíz	
1"	100.0		15,000	$\frac{100 - 5.5 \times 26}{100}$	24.57					
3/4"	95.4	4.6				0.0462	x	0.246	x 15,000	170.26
3/8"	3.5	91.9				0.9187	x	0.246	x 15,000	3,385.69
4	1.1	2.4				0.0238	x	0.246	x 15,000	87.79
8	0.8	0.3				0.0031	x	0.246	x 15,000	11.25
Fondo		0.8				0.0082	x	0.246	x 15,000	30.12
									3,685.11	

Agregado Tipo: 5ta % de Asfalto: 5.51 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar			Peso de Material por Tamíz	
3/4"	100.0		15,000	$\frac{100 - 5.5 \times 17}{100}$	16.06				0.00	
3/8"	70.0	30.0				0.2996	x	0.161	x 15,000	721.92
4	6.0	64.1				0.6407	x	0.161	x 15,000	1,543.87
8	1.4	4.6				0.046	x	0.161	x 15,000	110.87
Fondo		1.4				0.0136	x	0.161	x 15,000	32.83
									2,409.50	

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Agregado Tipo: 6ta % de Asfalto: 5.51 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
3/4"	100.0		15,000	$\frac{100 - 5.5 \times 55}{100}$	51.97		
3/8"	100.0	0.0				0 x 0.520 x 15,000	0.00
4	95.2	4.8				0.0483 x 0.520 x 15,000	376.69
8	68.7	26.4				0.2644 x 0.520 x 15,000	2,060.80
Fondo		68.7				0.6873 x 0.520 x 15,000	5,357.93
							7,795.43

Agregado Tipo: Cal % de Asfalto: 5.51 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
				$\frac{100 - 5.5 \times 2}{100}$	1.89	0.019	283.47

C. A. P. modificado con polímero tipo am3 % de Asfalto: 5.51 %

			15,000		5.5	0.055 x 15,000	826.50
					100.0		15,000.00

Tabla 26 - Dosificación para el moldeo para 5.51 % de Asfalto

Fuente: Elaboración Propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Agregado Tipo: 4ta % de Asfalto: 5.40 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
1"	100.0		15,000	$\frac{100 - 5.4 \times 26}{100}$	24.60		
3/4"	95.4	4.6				0.0462 x 0.246 x 15,000	170.45
3/8"	3.5	91.9				0.9187 x 0.246 x 15,000	3,389.63
4	1.1	2.4				0.0238 x 0.246 x 15,000	87.90
8	0.8	0.3				0.0031 x 0.246 x 15,000	11.26
Fondo		0.8				0.0082 x 0.246 x 15,000	30.15
							3,689.40

Agregado Tipo: 5ta % de Asfalto: 5.40 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
3/4"	100.0		15,000	$\frac{100 - 5.4 \times 17}{100}$	16.08		0.00
3/8"	70.0	30.0				0.2996 x 0.161 x 15,000	722.76
4	6.0	64.1				0.6407 x 0.161 x 15,000	1,545.67
8	1.4	4.6				0.046 x 0.161 x 15,000	111.00
Fondo		1.4				0.0136 x 0.161 x 15,000	32.87
							2,412.30

Agregado Tipo: 6ta % de Asfalto: 5.40 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
3/4"	100.0		15,000	$\frac{100 - 5.4 \times 55}{100}$	52.03		
3/8"	100.0	0.0				0 x 0.520 x 15,000	0.00
4	95.2	4.8				0.0483 x 0.520 x 15,000	377.13
8	68.7	26.4				0.2644 x 0.520 x 15,000	2,063.20
Fondo		68.7				0.6873 x 0.520 x 15,000	5,364.17
							7,804.50

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Agregado Tipo: Cal				% de Asfalto: 5.40 %			
Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
				$\frac{100 - 5.4 \times 2}{100}$	1.89	0.019	283.80

C. A. P. modificado con polímero tipo am3				% de Asfalto: 5.40 %			
			15,000	5.4	0.054	x 15,000	810.00
				100.0			15,000.00

Temperatura de mezclado 170 a 175 °C
Temperatura de compactación 155 a 160 °C

Tabla 27 - Dosificación para el moldeo para 5.4 % de Asfalto

Fuente: Elaboración Propia

Seguidamente, se colocan los agregados y el asfalto en el horno a la temperatura de mezclado requerida Figura 59. Este procedimiento se realizó con el peso total de 15.000 gramos.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



(a)



(b)

Figura 59 - (a) Agregados pétreos a introducir en el horno. (b) Asfalto colocado en el horno

Fuente: Elaboración Propia

3.3.7.3 MEZCLADO



(a)



(b)

Figura 60 - (a) Colocación de agregados pétreos en la mezcladora, (b) Mezclado

Fuente: Elaboración Propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Vaciar los agregados en la mezcladora mecánica la cual también se encuentra con su temperatura correspondiente, posterior a esto agregar el asfalto, cerrar la tapa y accionar la mezcladora durante unos minutos de manera a que se produzca una mezcla uniforme, como se observa en la Figura 60.

3.3.7.4 EJECUCIÓN DE LA PRUEBA

Retirar el molde de compactación del horno y llevar al compactador giratorio, engrasar las paredes del molde y el disco de papel para luego colocarlo en la base, esto para evitar que la mezcla asfáltica se adhiera al molde.

Posteriormente se debe colocar la muestra en el molde para luego inmediatamente colocar la tapa con el segundo disco de papel, cómo se observa en la Figura 61.



Figura 61 - Muestra lista para compactar

Fuente: Elaboración Propia

Para cada tenor de asfalto calculado en el diseño Marshall se elaboraron especímenes de mezclas con el cálculo previo de la densidad teórica máxima (Gmm), y con respecto

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

a eso se calculó las masas correspondientes para cada espécimen, como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 28 - Cálculo de masas para 5.51 % de asfalto

CÁLCULO DE LA MASA PARA EL COMPAC. GIRATORIO DV		
Parametro	Valor	Unidad
D	15.00	cm
Hest	11.00	cm
Gmm	2.373	
Vest	1,943.9	cm ³
Gmb=96%xGmm	2.278	gr/cm ³
Densidad agua a 25°C	0.9971	gr/cm ³
Dmb=GmbxDensagua	2.272	gr/cm ³
Masa=DmbxVest	4,415.7	gr
Temp de mezclado	170 a 175	°C
Temp de compactación	155 a 160	°C

Fuente: Elaboración Propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Tabla 29 - Cálculo de masas para 5.4 % de Asfalto

CÁLCULO DE LA MASA PARA EL COMPAC. GIRATORIO DV		
Parametro	Valor	Unidad
D	15.00	cm
Hest	11.00	cm
Gmm	2.377	
Vest	1,943.9	cm ³
Gmb=96%xGmm	2.281	gr/cm ³
Densidad agua a 25°C	0.9971	gr/cm ³
Dmb=GmbxDensagua	2.275	gr/cm ³
Masa=DmbxVest	4,422.0	gr
Temp de mezclado	170 a 175	°C
Temp de compactación	155 a 160	°C

Fuente: Elaboración Propia

3.3.7.5 COMPACTACIÓN

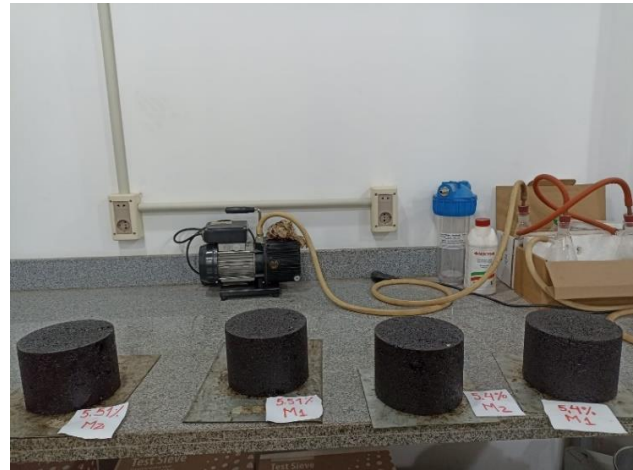
Introducir los datos en el compactador giratorio de acuerdo con el tenor de asfalto obtenido en el diseño Marshall, previamente se calcula la densidad máxima teórica Gmm de la mezcla y se procede al inicio de la compactación.

Al finalizar el proceso se debe extraer el molde del compactador, extraer la muestra y retirar los discos de papel y colocar la muestra sobre una superficie plana para que se pueda enfriar, cómo se observa en la Figura 62.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



(a)



(b)

Figura 62 - (a) Muestra Compactada, (b) Muestra a enfriar para luego ser procesada

Fuente: Elaboración Propia

3.3.7.6 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA BRUTA Y DENSIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA.

Se determinan los pesos específicos, gravedad específica bruta y densidad de la mezcla asfáltica compactada para el cálculo de las propiedades volumétricas

3.3.8 WHEEL TRACKING TEST

El Wheel Tracking Test, o Ensayo de la rueda cargada consiste en medir la velocidad de deformación o la deformación vertical que se produce en una muestra de mezcla asfáltica cuando una rueda cargada aplica una carga dinámica.

Para este trabajo final de grado se utilizaron dos pares de muestras prismáticas, estas muestras fueron moldeadas con ayuda del compactador tipo placa. Luego de determinar

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

la densidad de la muestra, se procede a colocar el molde en la máquina de WTT, y por medio del software ECO+ Main Test (EN 12697-22) se obtienen los datos que se pueden ver en Figura 62. Para la realización de este ensayo utilizamos como guía la Sección 6.2.6.10 del Manual de Carreteras del Paraguay. [13]

En la Tabla 30 se pueden ver los parámetros de evaluación de los resultados del ensayo.

Tabla 30 - Parámetros de evaluación del Ensayo Wheel Tracking Test

- EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO "Wheel Tracking Test" (Norma ENE-EN 12697-22 – Procedimiento B)				
Pendiente Media de Deformación (WTS AIRE) [mm/1000 ciclos de carga] en el intervalo de 5000 a 10000 ciclos y Profundidad Media de la Huella (PRD) [%]				
Tipo de capa	Clasificación por tránsito			
	T1	T2	T3	T4
Rodamiento	WTS aire \leq 0,08 PRD \leq 5%	WTS aire \leq 0,10 PRD \leq 8%	WTS aire \leq 0,12 PRD \leq 10%	WTS aire \leq 0,15 PRD \leq 10%
Base	WTS aire \leq 0,10 PRD \leq 8%	WTS aire \leq 0,12 PRD \leq 10%	WTS aire \leq 0,15 PRD \leq 10%	WTS aire \leq 0,15 PRD \leq 12%

Fuente: Manual de Carreteras del Paraguay [13]

3.3.8.1 EQUIPO Y HERRAMIENTAS

3.3.8.2 CONJUNTO DE COMPACTACIÓN

Está formado por un molde rectangular 30 x 30 x 5 cm y el compactador de placa. El molde se puede ver en la Figura 63.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



Figura 63 - Molde para compactación

Fuente: Elaboración propia

3.3.8.2.1 COMPACTADOR DE PLACA

La compactación de las probetas en forma de paralelepípedo (placas) de mezcla bituminosa se debe realizar aplicando una carga mediante un rodillo de acero o por ruedas neumáticas, haciendo pasadas a velocidad constante paralelamente al eje de la placa. En este método se recogen a su vez tres procedimientos posibles de compactación: con una o dos ruedas neumáticas, con rodillo de acero, o con placas verticales deslizantes. El método con rodillo de acero tiene a su vez una variante cuando se equipa con neumático, y además cada uno tiene dos posibilidades de compactación, bien con energía controlada o hasta que se alcance un volumen determinado y por consiguiente un determinado porcentaje de huecos. Para compactar con energía especificada se aplica una carga constante y se compacta hasta alcanzar el número requerido de pasadas; mientras que, para compactar con energía controlada, según un plan de compactación, se aplican una precarga y una carga progresiva que aumenta

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

después de cada pasada. En la Figura 64 se puede ver la muestra dentro del compactador de placa a punto de iniciar el proceso.



Figura 64 - Compactador con la muestra en su interior.

Fuente: Elaboración propia

3.3.8.2.2 MÁQUINA DE ENSAYO WTT

El equipo de rodadura se compone de una mesa de ensayo sobre la que se apoya la muestra, que se mueve hacia a los dos lados con un recorrido total de 230 ± 10 mm y una frecuencia de 26 ± 1 ciclos por minuto y sobre la que apoya una rueda neumática maciza que aplica una carga de 700 N. Lleva instalado un dispositivo de medida de la deformación vertical tomando lecturas en 50 mm en el centro del área de carga. La máquina se encuentra situada en el interior de una urna para mantener la temperatura homogénea, empleando una temperatura de ensayo 60 ± 1 °C como se puede apreciar en la Figura 65.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



Figura 65 - Máquina de Wheel Tracking Test.

Fuente: Elaboración propia

3.3.8.2.3. CÁMARA TERMOSTATIZADA

Para lograr que la temperatura sea constante durante el ensayo, se dispondrá de una cámara que permita alojar la máquina y mantener esta temperatura durante todo el ensayo con una variación máxima de $\pm 1^\circ \text{C}$. Un modelo apropiado puede ser el fabricado con perfiles metálicos y paneles aislantes, con la forma y dimensiones que corresponde. En uno de sus frentes llevará una ventana abatible transparente para permitir durante el ensayo la lectura del micrómetro y de la temperatura. En uno de sus lados está situada la puerta de acceso de la máquina, para la colocación y extracción de la probeta. En el interior irá colocado el elemento calefactor, con termostato regulable desde el exterior, y dos ventiladores, uno situado detrás de dicho elemento y el otro en posición lateral, con su eje perpendicular al del primero, para una mejor homogeneización de la temperatura en el interior de la cámara.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

3.3.8.2.4 HORNO

Para el calentamiento de los áridos, material bituminoso y moldes, se dispondrá de uno o más hornos adecuados, provistos de termostato y capaces de mantener las temperaturas especificadas con un error menor que 3°C.

3.3.8.2.5 TERMÓMETRO

Se recomienda el empleo de termómetros con escala de 0 a 200° C y sensibilidad mínima de 3° C. También pueden ser del tipo infrarrojo para evaluar la temperatura del asfalto y de los agregados.

3.3.8.2.6 BALANZA

Para pesar los áridos se utilizarán balanzas con la capacidad suficiente y una precisión mínima de 5 gr. Para pesar el filler y el ligante bituminoso se dispondrá de balanzas de precisión igual o menor que 1 gr.

3.3.8.2.7 MATERIAL GENERAL

Bandejas, espátulas, guantes, estopa etc.

3.3.8.3 ELABORACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

3.3.8.3.1. ACONDICIONAMIENTO DE LAS HERRAMIENTAS

Se deben precalentar dos hornos, uno a la temperatura de mezclado y otro a la temperatura de compactación, y se coloca el molde en el horno con la temperatura de compactación, además de los recipientes y accesorios que se utilizaran para hacer la probeta.

3.3.8.3.2 PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES

Se pesan y se separan los materiales por retenido mediante la proporción calculada por medio del volumen del molde y la densidad Marshall, dando como resultado un peso total de 11.000 gr aproximadamente considerando un porcentaje de perdida, de la misma

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

forma en la que se procedió para la dosificación Marshall, la siguiente tabla presenta las cantidades a preparar.

$$M = 1 \times 10^3 * L * a * e * Gmm * \left(\frac{100-V}{100} \right)$$

M: Masa de la mezcla, [kg]

L: Largo del molde, [cm]

A: Ancho del molde, [cm]

E: Espesor del molde, [cm]

Gmm: Densidad máxima de la Mezcla, [kg/m³]

V: Vacíos especificado, [%]

Tabla 31 - Cálculo de masas para 5.51 % de asfalto para probetas prismáticas

CÁLCULO DE LA MASA PARA EL WTT		
Parámetro	Valor	Unidad
Longitud	30.00	cm
Ancho	30.00	cm
Espesor	5.00	cm
Gmb	2.277	gr/cm ³
Volumen	4,500.0	cm ³
Masa=Gmb x Vol	10,965	gr
Masa Total =	11,000	gr

Fuente: Elaboración Propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Tabla 32 - Separación por retenidos para 5.51 % de Asfalto

Agregado Tipo: 4ta % de Asfalto: 5.51 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz	
1"	100.0		11,000	$\frac{100 - 5.5 \times 26}{100}$	24.57						
3/4"	95.4	4.6				0.0462	x	0.246	x	11,000	124.85
3/8"	3.5	91.9				0.9187	x	0.246	x	11,000	2,482.84
4	1.1	2.4				0.0238	x	0.246	x	11,000	64.38
8	0.8	0.3				0.0031	x	0.246	x	11,000	8.25
Fondo		0.8				0.0082	x	0.246	x	11,000	22.09
										2,702.41	

Agregado Tipo: 5ta % de Asfalto: 5.51 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz	
3/4"	100.0		11,000	$\frac{100 - 5.5 \times 17}{100}$	16.06						
3/8"	70.0	30.0				0.2996	x	0.161	x	11,000	529.41
4	6.0	64.1				0.6407	x	0.161	x	11,000	1,132.17
8	1.4	4.6				0.046	x	0.161	x	11,000	81.30
Fondo		1.4				0.0136	x	0.161	x	11,000	24.08
										1,766.96	

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Agregado Tipo: 6ta				% de Asfalto: 5.51 %			
Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
3/4"	100.0		11,000	$\frac{100 - 5.5 \times 55}{100}$	51.97		
3/8"	100.0	0.0				0 x 0.520 x 11,000	0.00
4	95.2	4.8				0.0483 x 0.520 x 11,000	276.24
8	68.7	26.4				0.2644 x 0.520 x 11,000	1,511.26
Fondo		68.7				0.6873 x 0.520 x 11,000	3,929.15
							5,716.65

Agregado Tipo: Cal				% de Asfalto: 5.51 %			
Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar	Peso de Material por Tamíz
				$\frac{100 - 5.5 \times 2}{100}$	1.89	0.019	207.88

C. A. P. modificado con polímero tipo am3				% de Asfalto: 5.51 %			
			11,000	5.5	0.055	x 11,000	606.10
							11,000.00

Tabla 33 - Cálculo de masas para 5.4 % de Asfalto para probetas prismáticas

CÁLCULO DE LA MASA PARA EL WTT		
Parámetro	Valor	Unidad
Longitud	30.00	cm
Ancho	30.00	cm
Espesor	5.00	cm
Gmb	2.275	gr/cm ³
Volumen	4,500.0	cm ³
Masa=Gmb x Vol	10,954	gr
Masa Total =	11,000	gr

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Tabla 34 - Separación por retenidos para 5.4 % de Asfalto

Agregado Tipo: 4ta % de Asfalto: 5.40 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz	
1"	100.0		11,000	$\frac{100 - 5.4 \times 26}{100}$	24.60						
3/4"	95.4	4.6				0.0462	x	0.246	x	11,000	125.00
3/8"	3.5	91.9				0.9187	x	0.246	x	11,000	2,485.73
4	1.1	2.4				0.0238	x	0.246	x	11,000	64.46
8	0.8	0.3				0.0031	x	0.246	x	11,000	8.26
Fondo		0.8				0.0082	x	0.246	x	11,000	22.11
										2,705.56	

Agregado Tipo: 5ta % de Asfalto: 5.40 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz	
3/4"	100.0		11,000	$\frac{100 - 5.4 \times 17}{100}$	16.08						
3/8"	70.0	30.0				0.2996	x	0.161	x	11,000	530.02
4	6.0	64.1				0.6407	x	0.161	x	11,000	1,133.49
8	1.4	4.6				0.046	x	0.161	x	11,000	81.40
Fondo		1.4				0.0136	x	0.161	x	11,000	24.11
										1,769.02	

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Agregado Tipo: 6ta % de Asfalto: 5.40 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz	
3/4"	100.0		11,000	$\frac{100 - 5.4 \times 55}{100}$	52.03						
3/8"	100.0	0.0				0	x	0.520	x	11,000	0.00
4	95.2	4.8				0.0483	x	0.520	x	11,000	276.56
8	68.7	26.4				0.2644	x	0.520	x	11,000	1,513.01
Fondo		68.7				0.6873	x	0.520	x	11,000	3,933.72
										5,723.30	

Agregado Tipo: Cal % de Asfalto: 5.40 %

Tamíz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Árido a Usar	% del Árido	Fórmula a Desarrollar				Peso de Material por Tamíz
				$\frac{100 - 5.4 \times 2}{100}$	1.89	0.019				208.12

C. A. P. modificado con polímero tipo am3 % de Asfalto: 5.40 %

			11,000		5.4	0.054	x	11,000		594.00
										100.0
										11,000.00

Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente se colocan los agregados y el asfalto en el horno a la temperatura de mezclado requerida.

3.3.8.3.3. MEZCLADO DE LOS MATERIALES

Teniendo los agregados previamente calentados en el horno, vaciarlos en la mezcladora, la cual también se encuentra con su temperatura de mezclado correspondiente, agregar el asfalto y mezclar hasta lograr una mezcla homogénea, cuidando que se mantenga la temperatura requerida, como se puede observar en la siguiente Figura 66

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



(a)



(b)

Figura 66 - (a) Áridos para la mezcla, (b) Proceso de mezclado

Fuente: Elaboración Propia

3.3.8.3.4 CURADO DE LA MEZCLA

Luego del mezclado se lleva la mezcla durante 2 horas \pm 5 min a la temperatura de compactación en el horno. Cada cierto tiempo homogeneizar la mezcla para mantener un uniforme acondicionamiento a una temperatura de 60°C.

3.3.8.3.5. PREPARACIÓN DE LA PROBETA

El molde previamente colocado en el horno de modo a que alcance su temperatura de mezclado es retirado y engrasado en todas sus paredes de modo a que la mezcla no se adhiera a ella. Luego se coloca la mezcla en el molde, se traslada al compactador y por encima es añadido un papel aceitado de forma a que la mezcla no se transfiera a la placa de acero. Este proceso como se puede observar en la siguiente Figura 67.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



(a)



(b)

Figura 67 - (a) Aceitado del molde, (b) Mezcla en el molde

Fuente: Elaboración Propia

3.3.8.3.6 COMPACTADO DE PROBETAS PRISMÁTICAS

Se coloca el molde con la mezcla en el compactador, configurar 5 pasadas como inicio. Al parar el equipo, se limpia el excedente de la mezcla. Luego se procede a repetir todo el proceso, configurando 45 pasadas (total 50 pasadas), luego el molde es extraído del compactador. Se deja la muestra compactada en el molde durante 24hs. aproximadamente. Este proceso se puede observar en la siguiente Figura 68

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



(a)



(b)

Figura 68 - (a) Compactador placa con cámara de calor, (b) Muestra compactada

Fuente: Elaboración Propia

3.3.8.3.7 GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA PROBETA

Una vez enfriada la probeta se procede a realizar el desmolde y hallar la densidad alcanzada por la misma mediante la siguiente formula:

$$G = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

A: Masa seca de la probeta

B: masa Saturada Superficie Seca de la probeta

C: Masa Sumergida de la probeta

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE



Figura 69 - Masa Saturada

Fuente: Elaboración Propia

3.3.8.4. MÉTODO DE PRUEBA WTT

Una vez que las probetas se encuentren a temperatura ambiente, posterior al ensayo de gravedad específica, se enciende el equipo Wheel Tracking Test y se inicia el software que trabaja en conjunto con el equipo, se introduce la información necesaria del proyecto y los requisitos de configuración, y se coloca la probeta dentro del equipo fijando el molde con la probeta en los anclajes ajustando el molde con la tuerca, manteniendo en posición horizontal, sin que se levante, se cierra la cámara con el objetivo de homogeneizar la temperatura del ensayo la cual es 60°C y se acondicionan el equipo y la probeta en simultáneo.

Una vez cerrada la cámara y asegurados los cerrojos se presiona el botón “Reset” en color rojo que se encuentra en el panel de control de la maquina y empieza el proceso de acondicionamiento de temperatura que dura aproximadamente 4 horas, esta duración indica la cantidad tiempo que necesita una probeta de prueba de forma cilíndrica introducida dentro de la maquina y conectada a uno de los sensores de temperatura hasta

**DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA
DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE**

llegar a la temperatura indicada para la ejecución del ensayo, la probeta de prueba mencionada hace referencia a la temperatura de la probeta real del ensayo, cuando esta esté en condiciones, la maquina empezara sus primeros movimientos de ida y vuelta hasta completar las 10.000 pasadas.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

CAPÍTULO IV

Análisis de los Resultados.

En esta sección se exponen los resultados de la parte experimental desarrollada en el capítulo anterior.

Las especificaciones técnicas y datos utilizados en los cálculos provienen de la obra “Rehabilitación y Mantenimiento de Carreteras por Niveles de Servicios (CREMA) Ruta Nacional N°1, Tramo: Quiindy – Villa Florida – San Juan Bautista”.

El diseño de mezclas seleccionado para el análisis en este trabajo pertenece a la capa de rodadura del pavimento. Figura 70

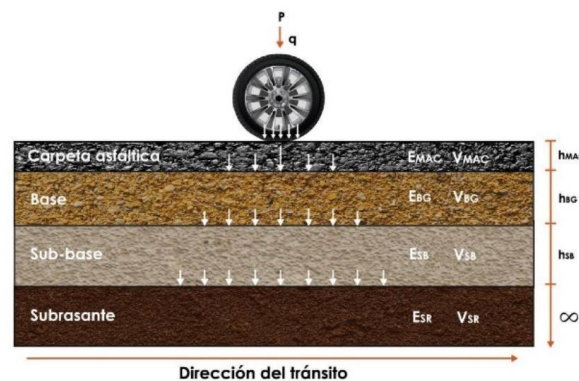


Figura 70 - Paquete estructural de un pavimento.

Fuente: (Loría, 2017) [2]

El diseño de mezclas que se realizó en este trabajo final de grado pertenece a una capa para rodadura de un pavimento. Se llevo a cabo un diseño de mezcla con asfalto modificado con polímero tipo AM3, con diferentes tenores de asfalto. Posteriormente se procedió a realizar la comparación de dos tipos de compactaciones, una con el compactador Marshall y otra con el compactador giratorio. El ensayo de ahuellamiento

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Wheel tracking test se realizó a la temperatura de 60°C fijándose como variables los vacíos teóricos objetivos de la mezcla asfáltica entre 6% - 8%, esto llevaría a una compactación de la mezcla de entre 98% - 96%.

4.1. RESULTADOS VERIFICACIÓN DEL DISEÑO DE MEZCLAS MÉTODO MARSHALL

Se elaboraron probetas para el diseño de mezclas asfálticas, y luego se procedió a verificar que los resultados se encuentren dentro de los requisitos especificados en el manual de carreteras, posteriormente se bajó el contenido de asfalto del diseño original, para así evaluar su comportamiento. Se considero para el diseño de la mezcla un alto tráfico, por lo que se dieron a cada probeta 75 golpes en toda la superficie y en ambas caras.

4.1.1. VERIFICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO

Para este caso se probaron 5 porcentajes de asfaltos 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%, con asfalto modificado tipo AM3.y se pudo llegar a la conclusión de que el óptimo valor es de 5.51%.

En este trabajo se procedió a verificar bajando el contenido óptimo de asfalto teniendo en cuenta que variaciones se podrían presentar en las características físicas y volumétricas de las probetas ensayadas y que éstas cumplan las exigencias técnicas para la obra.

Para la verificación se realizó 3 probetas con respecto al contenido optimo del diseño original, donde se obtuvieron los siguientes resultados que se pueden observar en la siguiente tabla:

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Tabla 35 - Características de la mezcla con 5.51%.

CARACTERISTICAS	EXIGENCIAS	RESULTADOS
Numero de golpes por cara	75	75
Estabilidad (kN)	≥ 10	14.8
Relacion Estabilidad/ Fluencia (kN/mm)	2.5 - 4.5	3.5
Vacios totales en la mezcla (%)	3.0 -5.0	4.0
Vacios del agregado Mineral (%)	≥ 14	16.48
Relacion Betun - Vacios (%)	65 - 75	75

Fuente: Elaboración Propia

Una vez determinada las gravedades específicas G_{mm} y G_{mb} se procedió a la verificación de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica.

Los datos que se muestran se utilizaron en la Tabla 36 para los cálculos y sus pueden ver en el Anexo 4.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Tabla 36 - Determinación de Parámetros Marshall de las probetas elaboradas

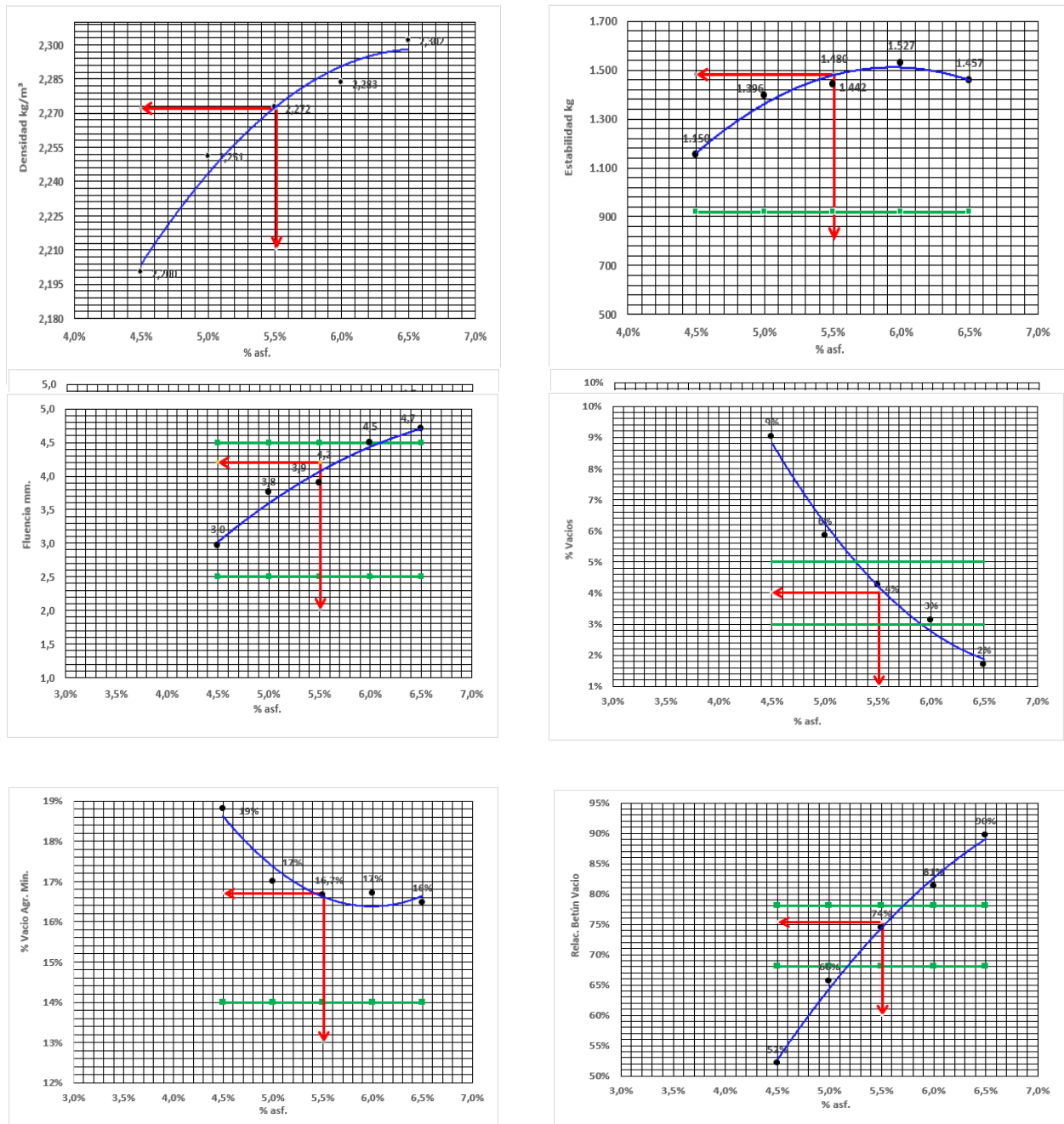
PROB. Nº	FECHA	% ASF. (en peso)	PESO SECO	PESO EN EL AGUA	PESO SAT. SUP. SECA	VOLUM.	G.E. Bulk Especimen (Gmb)marshall	GRAV. TEORICA (RICE)	VACIO MEZCL. ASF.	VMA, %	LECT. DIAL	LECT. DIAL x FACTOR ARO	FACTOR CORR.	ESTB.	FLUENC.	RELAC. ESTAB. / FLUENC.
		a	b	c	d	e = d - c	f = b / e	g	h = (g - f) / g	i = h + (f * pb)	o	p = o * 1,570	q	r = p * q	s	r / s
		%	gr.	gr.	gr.	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%		Kg/div	Kg		kg.	mm.	
1	14/1/2022	4,5	1.092,1	600,0	1.099,5	499,5	2,187				645	1.022	1,011	1.033	2,7	3.826
2	14/1/2022	4,5	1.091,8	595,0	1.097,6	502,6	2,172				720	1.138	1,008	1.147	2,8	4.098
3	14/1/2022	4,5	1.090,9	606,2	1.099,0	492,8	2,214				790	1.247	1,019	1.271	3,4	3.737
		4,5			Promedio		2,191	2,408	9,0	18,8				1.150	3,0	3.887
4	14/1/2022	5,0	1.090,5	608,6	1.094,3	485,6	2,246				880	1.386	1,043	1.446	3,7	3.908
5	14/1/2022	5,0	1.095,3	610,9	1.098,0	487,1	2,249				825	1.301	1,046	1.361	3,7	3.678
6	14/1/2022	5,0	1.092,7	607,0	1.090,6	483,6	2,259				810	1.278	1,053	1.346	3,8	3.541
		5,0			Promedio		2,251	2,391	5,8	17,0				1.396	3,8	3.541
7	14/1/2022	5,5	1.106,0	620,7	1.107,5	486,8	2,272				835	1.317	1,037	1.365	3,5	3.901
8	27/6/2021	5,5	1.101,5	618,7	1.103,4	484,7	2,273				915	1.441	1,029	1.483	4,4	3.369
9	27/6/2021	5,5	1.104,9	620,0	1.106,2	486,2	2,273				900	1.417	1,043	1.478	3,8	3.891
		5,5			Promedio		2,272	2,373	4,3	16,7				1.442	3,9	3.720
10	14/1/2022	6,0	1.102,1	622,1	1.103,3	481,1	2,291				910	1.433	1,040	1.490	4,3	3.466
11	14/1/2022	6,0	1.110,4	626,9	1.113,3	486,3	2,283				905	1.425	1,035	1.475	4,4	3.352
12	14/1/2022	6,0	1.105,2	622,6	1.108,1	485,6	2,276				960	1.511	1,035	1.563	4,5	3.474
		6,0			Promedio		2,283	2,357	3,1	16,7				1.527	4,5	3.470
13	14/1/2022	6,5	1.112,6	628,7	1.113,0	484,3	2,297				880	1.386	1,037	1.438	4,7	3.059
14	14/1/2022	6,5	1.108,8	626,3	1.109,3	483,0	2,296				880	1.386	1,040	1.442	4,4	3.277
15	14/1/2022	6,5	1.100,8	624,9	1.101,0	476,1	2,312				920	1.448	1,029	1.490	5,0	2.981
		6,5			Promedio		2,302	2,341	1,7	16,5				1.457	4,7	3.106

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los resultados expuestos se realizaron los gráficos Marshall.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Tabla 37 – (a) Resultados del Marshall con 5.51% de cap.



En cuanto a la elaboración de probetas se puede observar en la Tabla 37 que se

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

obtuvo un contenido óptimo de asfalto, con un promedio de vacíos de 4.0 %, todos los valores se encuentran dentro del rango de las especificaciones técnicas.

$$G_{mm} = 2.373$$

$$G_{sa} = 2.621$$

$$G_{sb} = 2.576$$

$$G_{se} = 2.577$$

$$P_{be} = 5.51\%$$

Tabla 38 - (b). Resultados del Marshall con la óptima 5.51% de cap.

PROB. N°	FECHA	% ASF. (en peso)	PESO SECO	PESO EN EL AGUA	PESO SAT. SUP. SECA	VOLUM.	G.E. Bulk Espécimen (Gmb)marshall	GRAV. TEORICA (RICE)	VACIO MEZCL. ASF.	VMA, %	VFA, %	C.A. Efectivo, % por peso mezcla (P _{be})
		a	b	c	d	e = d - c	f = b / e	g	h = (g - f) / g			
		%	gr.	gr.	gr.	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%			
1	14/1/2022	5,51	1.117,0	629,6	1.119,7	490,1	2,279	2,373				
2	14/1/2022	5,51	1.115,5	628,0	1.118,2	490,2	2,276	2,373				
3	14/1/2022	5,51	1.115,7	627,0	1.117,0	490,0	2,277	2,373				
		5,51				Promedio	2,277	2,373	4,0	16,5	75	5,51

Fuente: Elaboración Propia

Una vez obtenidos los resultados del diseño original, se procedió a realizar la prueba de disminuir el contenido óptimo con el fin de evaluar sus propiedades volumétricas. En la siguiente Tabla 39 se observan los valores que se obtuvieron en el moldeo de las probetas.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Tabla 39 - Resultados del Marshall con el contenido 5.4% de cap.

PROB. Nº	FECHA	% ASF. (en peso)	PESO SECO	PESO EN EL AGUA	PESO SAT. SUP. SECA	VOLUM.	G.E. Bulk Espécimen (Gmb)marshall	GRAV. TEORICA (RICE)	VACIO MEZCL. ASF.	VMA, %	VFA, %	C.A. Efectivo, % por peso mezcla (P _{be})	
		a	b	c	d	e = d - c	f = b / e	g	h = (g - f) / g				
		%	gr.	gr.	gr.	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%				
1	7/2/2022	5,40	1.115,7	626,1	1.117,1	491,0	2,272	2,377					
2	7/2/2022	5,40	1.116,7	627,1	1.118,2	491,1	2,274	2,377					
3	7/2/2022	5,40	1.114,6	626,5	1.116,2	489,7	2,276	2,377					
		5,40					Promedio	2,274	2,377	4,3	16,5	73,9	5,40

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 40 - Características de la mezcla con 5.4%.

CARACTERISTICAS	EXIGENCIAS	RESULTADOS
Numero de golpes por cara	75	75
Estabilidad (kN)	≥ 10	14.4
Relacion Estabilidad/ Fluencia (kN/mm)	2.5 - 4.5	4.2
Vacios totales en la mezcla (%)	3.0 - 5.0	4.3
Vacios del agregado Mineral (%)	≥ 14	16.51
Relacion Betun - Vacios (%)	65 - 75	73.9

Fuente: Elaboración Propia

De la verificación del diseño Marshall se puede observar que con un porcentaje de asfalto del 5.51% en la mezcla se obtiene en promedio un vacío de 4.0%, disminuyendo el tenor de asfalto del diseño original se obtuvo un promedio de vacío de 4.3%, se verifica que, con el aumento de asfalto, el porcentaje de vacío en la mezcla total disminuye.

El valor del VAM para 5.51% es de 16.48% y para 5.4% es de 16.51%, el porcentaje del VAM con el incremento del asfalto decrece a un valor mínimo y luego comienza a

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

augmentar, nos indica el espacio intergranular de vacíos que existe entre las partículas de los agregados de la mezcla compactada que incluyen a los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, el valor mencionado es mayor al 14%, por lo tanto, cumple con los requisitos.

Se obtiene un valor de Relación Betún-Vacíos para el tenor de 5.51% de asfalto de 75.5%, este valor excede en 0.5% el límite exigido, y lo que puede ocasionar es un exceso en la cantidad de asfalto en la mezcla, dicho valor representa que del 100% del volumen de vacíos, 75.5% corresponde al volumen ocupado por asfalto, en cuanto al disminuir el tenor de asfalto a 5.4%, el valor del RBV es de 73.9%, se verifica que al aumentar el contenido de cap aumenta la relación. En cuanto a la estabilidad Marshall con un resultado de 14.8 kN para 5.51% de cap y 14.4 kN para 5.4% en promedio se logra superar el mínimo exigido, la relación Estabilidad/Fluencia varia para un contenido óptimo de diseño de 5.51% en 3.5 kN/mm y para 5.4% varia en un promedio de 4.2 kN/mm, el cual también se encuentra en el rango que se exige.

También es necesaria la verificación de las gravedades específicas de la composición del de la mezcla agregados, mencionados en Tabla 41, en donde se debe cumplir que $G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$.

G_{sb} es siempre el más bajo ya que contienen las partículas, es decir todos los vacíos que van a ser rellenados con asfalto. G_{se} en esto se consideran solo los vacíos que van a ser rellenados con asfalto, es el valor intermedio. G_{sa} es siempre el más alto ya que se considera solo los vacíos que van a ser rellenados con asfalto. Al ejecutar esta prueba, se debe tener en cuenta de que los valores calculados tengan sentido entre sí. [19]

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Si no se cumple la relación se deberán revisar los resultados de los ensayos de densidad relativa del material pétreo (G_{sb} y G_{sa}) y de densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica (G_{mm}). En la Tabla 41 se muestran los procesos seguidos para determinar dichas densidades.

Tabla 41 - Gravedades específicas de la composición del de la mezcla agregados

N de muestra	Material	Dosificación		Grav específica aparente del agregado (g/cm^3)	Grav específica aparente de la mezcla de agregados (g/cm^3)	Grav específica bulk del agregado (g/cm^3)	Grav específica bulk de la mezcla de agregados (g/cm^3)	Grav específica efectiva del agregado de la mezcla (g/cm^3)
		Aridos (%)	Mezcla (%)					
1	25-19	26,0	26,0	2,652	2,621	2,637	2,576	2,612
2	19-12,5	17,0	17,0	2,624		2,605		
3	0-6	55,0	55,0	2,621		2,553		
4	Cal	2,0	2,0	2,267		2,267		
Dm =		100						
CONDICION					Gsa >	Gse >	Gsb	OK
					2,621	2,612	2,576	OK

Fuente: Elaboración Propia

4.2 RESULTADOS DE LA COMPACTACIÓN GIRATORIA

4.2.1 RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE MASAS PARA COMPACTACIÓN

Se elaboraron probetas para la compactación giratoria, primeramente, calculando la masa que va a ir dentro del molde, esto se realizó con el contenido óptimo de asfalto que se obtuvo en el diseño Marshall que corresponde a 5.51%, donde también se sometió a compactación con la disminución de asfalto que corresponde al 5.4% con relación al del diseño. Se considera para la compactación un tráfico pesado, en el caso del Marshall se emplea a 75 golpes por cara, en este caso con la compactación giratoria se maneja a niveles de ciclos o niveles de alturas, por ende, al fabricar las probetas se tienen dos variables, una es la altura y otra la densidad, si fijamos el parámetro a niveles de altura, se eliminaría una de las variables y solo voy las densidades y variando las masas. Para esto se procedió a calcular previamente las

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

masas con una densidad teórica, en la siguiente Tabla 42 y Tabla 43 se observan los valores que se obtuvieron en el moldeo de las probetas.

Tabla 42 - (a) Masa para probetas compactadas en el Giratorio para 5.51% de cap

CÁLCULO DE LA MASA PARA EL COMPAC. GIRATORIO DV		
Parámetro	Valor	Unidad
D	15.00	cm
Hest	11.00	cm
Gmm	2.373	
Vest	1,943.9	cm ³
Gmb=96% \times Gmm	2.278	gr/cm ³
Densidad agua a 25°C	0.9971	gr/cm ³
Dmb=Gmb \times Densagua	2.272	gr/cm ³
Masa=Dmb \times Vest	4,415.7	gr

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 43 - (b) Masa para probetas compactadas en el Giratorio para 5.4% de cap

CÁLCULO DE LA MASA PARA EL COMPAC. GIRATORIO DV		
Parámetro	Valor	Unidad
D	15.00	cm
Hest	11.00	cm
Gmm	2.377	
Vest	1,943.9	cm ³
Gmb=96% \times Gmm	2.281	gr/cm ³
Densidad agua a 25°C	0.9971	gr/cm ³
Dmb=Gmb \times Densagua	2.275	gr/cm ³
Masa=Dmb \times Vest	4,422.0	gr

Fuente: Elaboración Propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

4.2.2 RESULTADOS DE LA COMPACTACIÓN

Para este caso se elaboraron 4 especímenes cilíndricos para cada contenido de asfalto un grupo con 5.51% y otro con 5.4% de asfalto modificado tipo AM3, en la compactación giratoria se puede monitorear de forma constante la altura del espécimen durante el proceso de compactación, las curvas que se obtiene reflejan la dureza y la trabajabilidad de la mezcla. En la compactación se tiene en cuenta el número de giros, que esta expresada en términos de la densidad máxima teórica G_{mm} , para el caso tenemos en cuenta el de diseño $N_{dis} = 100$, lo que tendría que reproducir el 4% de vacíos en la mezcla, la altura de los especímenes varía en 115 ± 5 mm, una vez compactada la mezcla se retira del equipo y se procede a determinar su grado de compactación, hallando las gravedades específicas como se refleja en la Tabla 44

Tabla 44 - (a) Especímenes Compactados en el Giratorio para 5.51% de cap a $N_{max} = 160$

Número Espécimen	Fecha	C.A., % por peso de mezcla (P_b)	Gravedad Específica Bulk de Mezcla Compactada (G_{mb}) Giratorio					G.E. Bulk Espécimen (G_{mb}) giratorio	G.E. Max. Mezcla Suelta (G_{mm})	G.E. Bulk. Agregado (G_{sb})	Altura probeta mm
			Masa al aire (g)	Masa al agua (g)	Masa al aire SSS (g)	Absorción de agua, % por volumen	Volumen Bulk (cc)				
01	16/5/2022	5,51	4.413,2	2.543,6	4.417,8	0,25	1.874,2	2,355	2,373	2,576	108,30
02	16/5/2022	5,51	4.415,8	2.546,2	4.419,4	0,19	1.873,2	2,357	2,373	2,576	108,30
Promedios X:		5,51				0,220	1.873,7	2,356	2,373	2,576	108,30

(G_{mb}) Giratorio	2,356
(G_{mb}) Marshall	2,277
% moldeo	103%

Fuente: Elaboración Propia

La altura de los especímenes indica que están sobre compactados esto debido a que se calculó al número de giros máximo $N_{max} = 160$, por lo que para el cálculo de vacíos de la mezcla se tomó el valor de la altura al número de giros de $N_{dis} = 100$ de la tabla que genera el ensayo de compactación del equipo.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

En la prueba 2 se realizó la compactación al número de diseño $N_{dis} = 100$, por lo que se refleja en la Tabla 45, donde el vacío en la mezcla promedio es de 4.51%, alcanzando un grado de compactación del 100%.

Tabla 45 - (b) Especímenes Compactados en el Giratorio para 5.51% de cap a $N_{max} = 100$

Número Espécimen	Fecha	C.A., % por peso de mezcla (P_b)	Gravedad Específica Bulk de Mezcla Compactada (G_{mb}) Giratorio					Análisis de Vacíos						
			Masa al aire (g)	Masa al agua (g)	Masa al aire SSS (g)	Absorción de agua, % por volumen	Volumen Bulk (cc)	G.E. Bulk Espécimen (G_{mb}) giratorio	G.E. Max. Mezcla Suelta (G_{mm})	G.E. Bulk. Agregado (G_{sb})	Vacios de Aire, % del volumen total (V_v)	VMA, %	VFA, %	Altura probeta mm
01	23/2/2021	5,51	4.399,6	2.476,2	4.409,2	0,50	1.933,0	2,276	2,373	2,576	4,09	16,53	75,27	112,00
02	23/2/2021	5,51	4.401,4	2.459,2	4.410,0	0,44	1.950,8	2,256	2,373	2,576	4,93	17,26	71,44	112,30
Promedios X:		5,51								2,576	4,51	16,88	73,29	112,15

(G_{mb}) Giratorio	2,266
(G_{mb}) Marshall	2,277
% moldeado	100%

Fuente: Elaboración Propia

Una vez determinada las densidades tanto suelta de la mezcla G_{mm} como la compactada G_{mb} para N_{dis} se procedió a la verificación de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Tabla 46 - (c) Factor de corrección para $N_{dis} = 100$, con 5.51% de cap, compactado al $N_{max} = 160$

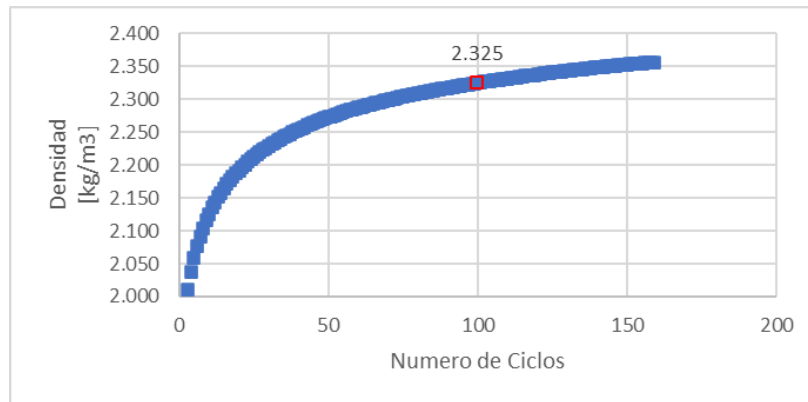
GRAVEDADES ESPECIFICAS	
Masa al aire (g)	4.416
Masa al agua (g)	2.546
Masa al aire SSS (g)	4.419
G.E. Bulk Espécimen (Gmb)gyratorio	2.357
G.E. Bulk Espécimen (Gmb)gyratorio N final : 160	2.306
Fc	1,022

Fuente: Elaboración Propia

El espécimen se compacto hasta los giros $N_{max} = 160$ que es esencia un factor de seguridad contra el ahuellamiento, este parámetro es un indicador de desempeño del esqueleto mineral, por lo que se empleó un factor de corrección para hallar el $N_{dis} = 100$ para evaluar el porcentaje de vacíos alcanzados para una densidad obtenida, como se observa en la Tabla 47.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Tabla 47 - (a) Densidad Gmb obtenida para $N_{dis} = 100$, con 5.51% de cap, compactado al $N_{max} = 160$



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 48 - (b) Porcentaje de vacíos obtenido para $N_{dis} = 100$, con 5.51% de cap, compactado al $N_{max} = 160$

VACIOS PARA NDIS: 100

N100	2.325
Gmm	2.373
Va	2,022

Fuente: Elaboración Propia

Para los valores de vacíos en la mezcla obtenidos en las pruebas de 5.51% de cap, al $N_{dis} = 100$ son menores a los rangos establecidos de variación que es de 3%- 5%, esto indica que estamos sobre compactando el espécimen. Mientras que en la prueba 2, los vacíos se encuentran dentro de los parámetros ya que estos se compactaron a $N_{dis} = 100$.

Con el contenido de asfalto 5.4%, en la prueba 1 se obtuvieron los siguientes

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

resultados, como se contemplan en la Tabla 49

Tabla 49 - (a) Especímenes Compactados en el Giratorio para 5.4% de cap a Nmax =100

Número Espécimen	Fecha	C.A., % por peso de mezcla (P _s)	Gravedad Específica Bulk de Mezcla Compactada (G _{mb}) Giratorio					Análisis de Vacíos						
			Masa al aire (g)	Masa al agua (g)	Masa al aire SSS (g)	Absorción de agua, % por volumen	Volumen Bulk (cc)	G.E. Bulk Espécimen (G _{mb}) giratorio	G.E. Max. Mezcla Suelta (G _{mm})	G.E. Bulk. Agregado (G _{sb})	Vacios de Aire, % del volumen total (V _v)	VMA, %	VFA, %	Altura probeta mm
01	23/2/2021	5,40	4.493,8	2.524,6	4.504,2	0,53	1.979,6	2,270	2,377	2,576	4,50	16,65	72,97	114,50
02	23/2/2021	5,40	4.404,2	2.465,0	4.417,0	0,66	1.952,0	2,256	2,377	2,576	5,09	17,17	70,35	113,10
Promedios X:		5,40				0,60	1.965,8	2,260	2,377	2,576	4,92	17,01	71,06	113,80

(G _{mb}) Giratorio	2,260
(G _{mb}) Marshall	2,274
% moldeo	99%

Fuente: Elaboración Propia

Los valores obtenidos de vacíos en la mezcla dieron un promedio de 4.92%, que se encuentra dentro de los parámetros de 3-5%, en el Tabla 50 se obtendrá visibilidad del cálculo con los factores de corrección que se tomaron en cuenta y de cómo varían las densidades durante el proceso de compactación.

En la prueba 2 teniendo en cuenta el mismo contenido asfáltico 5.4%, con el número de giros máximo N_{max} = 160 se obtuvieron los siguientes resultados

Tabla 50 - (b) Especímenes Compactados en el Giratorio para 5.4% de cap a Ndis =160

Número Espécimen	Fecha	C.A., % por peso de mezcla (P _s)	Gravedad Específica Bulk de Mezcla Compactada (G _{mb}) Giratorio					Análisis de Vacíos						
			Masa al aire (g)	Masa al agua (g)	Masa al aire SSS (g)	Absorción de agua, % por volumen	Volumen Bulk (cc)	G.E. Bulk Espécimen (G _{mb}) giratorio	G.E. Max. Mezcla Suelta (G _{mm})	G.E. Bulk. Agregado (G _{sb})	Vacios de Aire, % del volumen total (V _v)	VMA, %	VFA, %	Altura probeta mm
01	16/5/2022	5,40	4.420,0	2.523,4	4.425,2	0,27	1.901,8	2,324	2,377	2,576	2,23	14,67	84,80	109,60
02	16/5/2022	5,40	4.422,6	2.514,2	4.429,0	0,33	1.914,8	2,310	2,377	2,576	2,82	15,18	81,43	110,40
Promedios X:		5,40				0,300	1.908,3	2,317	2,377	2,576	2,52	14,91	83,07	110,00

(G _{mb}) Giratorio	2,317
(G _{mb}) Marshall	2,274
% moldeo	102%

Fuente: Elaboración Propia

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Una vez determinada las densidades tanto suelta de la mezcla G_{mm} como la compactada G_{mb} para N_{dis} se procedió a la verificación de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica.

Tabla 51 -(c) Factor de corrección para $N_{dis} = 100$, con 5.4% de cap, compactado al $N_{max} = 160$

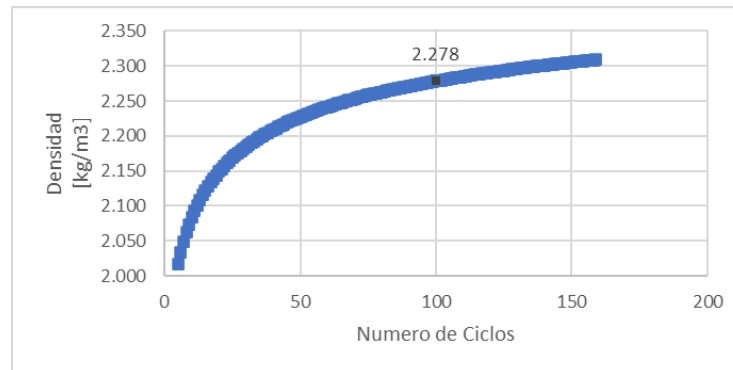
GRAVEDADES ESPECIFICAS	
Masa al aire (g)	4.423
Masa al agua (g)	2.514
Masa al aire SSS (g)	4.429
G.E. Bulk Espécimen (G_{mb})gyratorio	2.310
G.E. Bulk Espécimen (G_{mb})gyratorio N final : 160	2.264
Fc	1,020

Fuente: Elaboración Propia

El espécimen se compactó hasta los giros $N_{max} = 160$, por lo que se empleó un factor de corrección para hallar el $N_{dis} = 100$ para evaluar el porcentaje de vacíos alcanzados para una densidad obtenida, como se observa en la Tabla 52.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Tabla 52 - (a) Densidad Gmb obtenida para Ndis =100, con 5.4% de cap, compactado al Nmax = 160



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 53 - (b) Porcentaje de vacíos obtenido para Ndis =100, con 5.4% de cap, compactado al Nmax = 160

VACIOS PARA NDIS: 100

N100	2.278
Gmm	2.377
Va	4,1

Fuente: Elaboración Propia

4.2.3 COMPARATIVA DE RESULTADOS DE LAS MEZCLAS

En la Tabla 54 se muestra la comparativa de los resultados de los ensayos Marshall con relación a la compactación Giratoria en ambas mezclas.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Tabla 54 - Parámetros de diseño de la compactación Marshall vs compactación giratoria

Parámetros de Diseño	Marshall 5.51%	Giratorio 100 5.51%	Marshall 5.4%	Giratorio 100 5.4%
Contenido de Asfalto (%)	5.51	5.51	5.4	5.4
Va (%)	4.0	2.2	4.3	4.1
Vam (%)	16.48	14	16.51	14.91
Gmb (gr/cm ³)	2.277	2.356	2.274	2.278

Fuente: Elaboración Propia

El contenido de vacíos en la giratoria con respecto a la compactación Marshall resultó menor para ambos contenidos asfálticos. Se puede notar que para el menor contenido asfáltico que es el de 5.4% se tiene un porcentaje de vacíos de 4.1% que es el que más se acerca al de diseño que es el 4.0%, teniendo en cuenta que es de especial importancia reflexionar acerca de las repercusiones que puede tener el alto contenido de asfalto en la mezcla debido a las altas temperaturas en nuestro país, como así también la importancia de la selección del método de compactación durante la etapa de diseño, al disminuir el contenido de cap de diseño se concluye que cumplen con todos los parámetros requeridos en los criterios de dosificación.

La compactación giratoria simula mejor las condiciones de densificación de un pavimento en servicio, se observa que, para la mezcla asfáltica densa en estudio, la compactación dinámica proporcionada por el método Marshall se podría estar quedando corta, al tratar de simular las condiciones de densificación en el campo, por la forma en cómo se compacta con los equipos en la zona de colocación de la mezcla, al generar densidades más bajas con respecto al procedimiento de compactación giratoria. Lo anterior tiene como consecuencia directa la elección de contenidos de asfaltos “óptimos” mayores a los

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

requeridos dependiendo de la zona como es el caso de nuestro país, con altas temperaturas es susceptible a deformaciones plásticas, condición que podría afectar directamente el desempeño de la mezcla asfáltica. Teniendo en cuenta que la carpeta de rodadura es la superficie más costosa de la estructura del pavimento flexible, es importante mencionar otro inconveniente directamente relacionado con lo dicho, el hecho de encarecer la elaboración de la mezcla asfáltica utilizando más volumen de asfalto del requerido.

4.3 RESULTADOS WHEEL TRACKING TEST

4.3.1 RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE MASAS PARA COMPACTACIÓN

Se realizaron 2 probetas por cada tipo de asfalto, en total fueron 4 probetas ensayadas, se procedió a los cálculos para determinar las masas para el compactador de placa. Teniendo el volumen de un prisma rectangular de dimensiones estandarizadas de acuerdo con el método.

Para conocer la cantidad de masa a utilizar en el ensayo se tuvo en cuenta que la muestra debía tener como densidad aquella que sea como mínimo igual a el 97% de la densidad Marshall, como se menciona en la sección 6.2.6.10.3, ítem a) del Manual de Carreteras del Paraguay, para mezclas densas y semidensas.

Para este caso, arrojo un resultado de aproximadamente 11.000 gr. por cada probeta.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

La masa se obtiene para la muestra se obtiene como se observa en la Tabla 55.

CÁLCULO DE LA MASA PARA EL WTT		
Parámetro	Valor	Unidad
Longitud	30.00	cm
Ancho	30.00	cm
Espesor	5.00	cm
Gmb	2.277	gr/cm ³
Volumen	4,500.0	cm ³
Masa=Gmb x Vol.	10,965	gr
Masa Total =	11,000	gr

(a)

CÁLCULO DE LA MASA PARA EL WTT		
Parámetro	Valor	Unidad
Longitud	30.00	cm
Ancho	30.00	cm
Espesor	5.00	cm
Gmb	2.275	gr/cm ³
Volumen	4,500.0	cm ³
Masa=Gmb x Vol.	10,954	gr
Masa Total =	11,000	gr

(b)

Tabla 55 - (a) Masa para probetas 5.51% de cap. (b) Masa para probetas 5.4% de cap

Fuente: Elaboración Propia

La temperatura promedio de mezclado fue de 175°C y la temperatura promedio de compactación fue de 165°C.

4.3.2 PROPIEDADES DE LAS PROBETAS COMPACTADAS

Se presentan los datos iniciales para la realización del ensayo:

Tabla 56 - Datos iniciales del WTT.

Datos del ensayo	
Tipo de asfalto	Modificado tipo AM3
Acondicionamiento de la probeta	4 horas
Temperatura de prueba	60°C
Carga aplicada	700±N
Velocidad de las ruedas	26.5 ciclos/min
Acondicionamiento en ciclos	5 ciclos
Ciclos del ensayo	10000 ciclos

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Una vez realizada la compactación de las probetas se realiza la comprobación de las densidades por inmersión, por medio de eso se obtiene la densidad Bulk (G_{mb}) de la mezcla compactada, así como los vacíos de la mezcla por medio de la densidad máxima teórica (G_{mm}), los resultados se muestran en la Tabla 57

Tabla 57 - (a) Cálculo de Gravedades Específicas y Grado de Compactación de las probetas, para 5.51 % de cap

VERIFICACIÓN DE MEZCLA PREPARADA CON EL TENOR ÓPTIMO DE ASFALTO.													
Número Espécimen	Fecha	C.A., % por peso de mezcla (P_b)	Gravedad Específica Bulk de Mezcla Compactada (G_{mb}) Wtt				Volumen Bulk (cc)	G.E. Bulk Espécimen (G_{mb})wtt	G.E. Bulk Espécimen (G_{mb})	G.E. Max. Mezcla Suelta (G_{mm})	Vacíos de Aire, % del volumen total (V_a)	Grado de compactación	Espesor
			Masa al aire (g)	Masa al agua (g)	Masa al aire SSS (g)								
M1	19/5/2022	5,51	10.335,1	5.798,0	10.340,0	4.542,0	2,275	2,277	2,373	4,13	100	50,10	
M2	19/5/2022	5,51	10.336,4	5.803,3	10.401,1	4.597,8	2,248	2,277	2,373	5,27	99	49,90	
Promedios X:		5,51				4.569,9	2,262	2,277	2,373	4,68	99	50,00	

VERIFICACIÓN DE MEZCLA PREPARADA CON EL TENOR ÓPTIMO DE ASFALTO.													
Número Espécimen	Fecha	C.A., % por peso de mezcla (P_b)	Gravedad Específica Bulk de Mezcla Compactada (G_{mb}) Wtt				Volumen Bulk (cc)	G.E. Bulk Espécimen (G_{mb})wtt	G.E. Bulk Espécimen (G_{mb})	G.E. Max. Mezcla Suelta (G_{mm})	Vacíos de Aire, % del volumen total (V_a)	Grado de compactación	Espesor
			Masa al aire (g)	Masa al agua (g)	Masa al aire SSS (g)								
M1	17/5/2022	5,40	10.115,9	5.597,4	10.214,2	4.616,8	2,191	2,274	2,377	7,83	96	50,00	
M2	17/5/2022	5,40	10.226,5	5.769,0	10.296,5	4.527,5	2,259	2,274	2,377	4,96	99	50,00	
Promedios X:		5,40				4.587,2	2,195	2,274	2,377	7,66	98	50,00	

(b) Cálculo de Gravedades Específicas y Grado de Compactación de las probetas, para 5.4 % de cap

Fuente: Elaboración Propia

Se analizaron a las mezclas para 5.51% de cap un grado de compactación de 99% y para el 5.4% de cap un grado de compactación promedio de 98% con respecto a la densidad

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Marshall, es decir, en el límite mínimo exigido por el Manual de carreteras que se refiere a un 97% lo que equivaldría a un 7% de vacíos, de esta manera se procede a analizar la influencia de los vacíos en los resultados del ahuellamiento en las mezclas.

Para la muestra N° 1 con 5.51 % de cap se tiene 4.13 % de vacíos

Para la muestra N° 2 con 5.51 % de cap se tiene 5.27 % de vacíos

Resultados de la máquina de ensayo – Muestra 1:

El primer grafico nos indica las deformaciones de la probeta a medida que los números de pasadas van aumentando, hasta llegar al valor de 10.000 pasadas de la rueda.

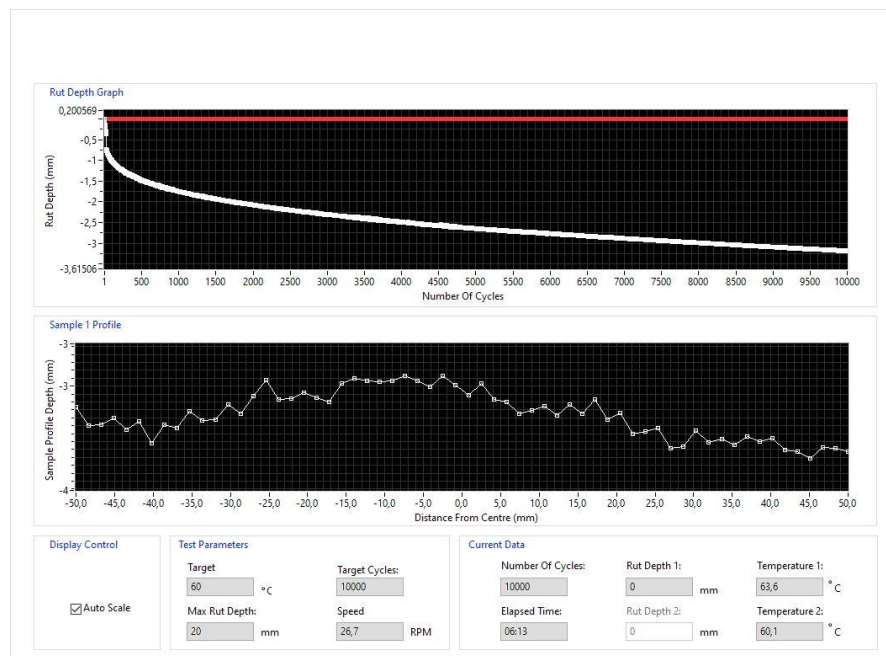


Figura 71 - (a) Gráficos resultantes del WTT de la probeta M1 con 5.51% de cap

A partir de los gráficos expuestos en la Figura 71 fue posible aplicar las ecuaciones para hallar WTS y PRD se tienen los resultados resultados:

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

$$D_{10000} = 3.19 \text{ mm}$$

$$D_{5000} = 2.67 \text{ mm}$$

La pendiente media de deformación (mm/1000 ciclos de carga):

$$w_{T_s} = \frac{D_{10.000} - D_{5000}}{5} \quad w_{T_s} = 0.10 \text{ mm/ciclos}$$

La profundidad media de la huella (%):

$$PRD = \frac{D_{10000}}{50} \quad PRD = 6.4 \%$$

Se observa que los resultados tanto en la pendiente WTS, entre los ciclos 5.000 y 10.000, como la profundidad de la huella, corresponden a un tráfico del tipo T2.

La relación porcentual de la profundidad de ahuellamiento para el ciclo de carga de 10.000 y el espesor medio de la probeta (PRD), arrojo un resultado de 6.4% correspondiendo a un tráfico de clasificación tipo T2, para una carpeta de rodadura.

Resultados de la máquina de ensayo – Muestra 2:

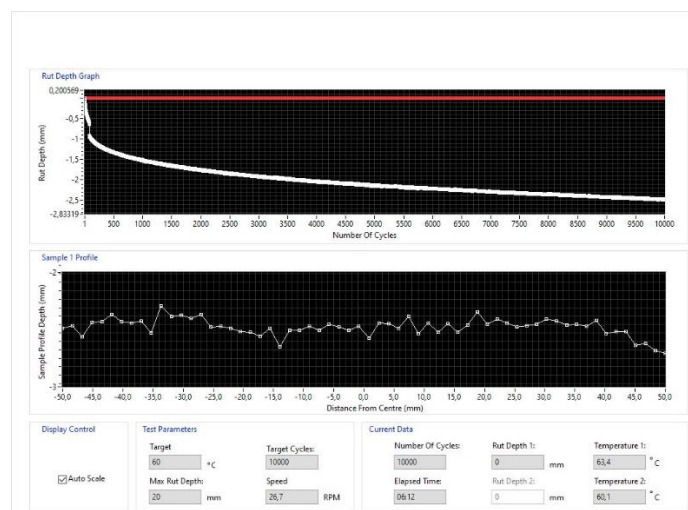


Figura 72 - (b) Gráficos resultantes del WTT de la probeta M2 con 5.51% de cap

Fuente: Software ECO+ Main Test [28], CDTV.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

A partir de los gráficos expuestos en la Figura 72 fue posible aplicar las ecuaciones para hallar WTS y PRD se tienen los resultados

resultados:

$$D_{10000} = 2.49 \text{ mm}$$

$$D_{5000} = 2.15 \text{ mm}$$

La pendiente media de deformación (mm/1000 ciclos de carga):

$$w_{T_s} = \frac{D_{10.000} - D_{5000}}{5} \quad w_{T_s} = 0.0680 \text{ mm/ciclos}$$

La profundidad media de la huella (%):

$$PRD = \frac{D_{10000}}{50} \quad PRD = 5 \%$$

Se observa que los resultados tanto en la pendiente WTS, entre los ciclos 5.000 y 10.000, como la profundidad de la huella, corresponden a un tráfico del tipo T2, también pudiendo corresponder a una clasificación del tipo T1.

La relación porcentual de la profundidad de ahuellamiento para el ciclo de carga de 10.000 y el espesor medio de la probeta (PRD), arroja un resultado de 5% correspondiendo a un tráfico de clasificación tipo T2 y también T1, para una carpeta de rodadura.

Para la muestra N° 1 con 5.4 % de cap se tiene 7.83 % de vacíos

Para la muestra N° 2 con 5.4 % de cap se tiene 4.96 % de vacíos

Resultados de la máquina de ensayo – Muestra 1:

El primer gráfico nos indica las deformaciones de la probeta a medida que los números de pasadas van aumentando, hasta llegar al valor de 10.000 pasadas de la rueda.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

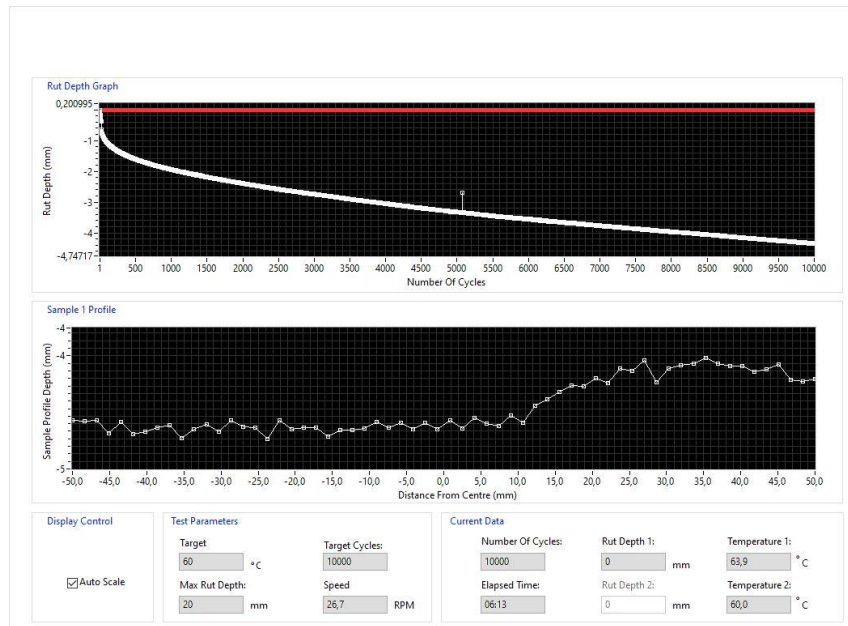


Figura 73 - (a) Gráficos resultantes del WTT de la probeta M1 con 5.4% de cap

Fuente: Software ECO+ Main Test [28], CDTV.

A partir de los gráficos expuestos en la Figura 73 fue posible aplicar las ecuaciones para hallar WTS y PRD se tienen los resultados

resultados:

$$D_{10000} = 4.43 \text{ mm}$$

$$D_{5000} = 3.39 \text{ mm}$$

La pendiente media de deformación (mm/1000 ciclos de carga):

$$w_{T_s} = \frac{D_{10.000} - D_{5000}}{5} \quad w_{T_s} = 0.20 \text{ mm/ciclos}$$

La profundidad media de la huella (%):

$$PRD = \frac{D_{10000}}{50} \quad PRD = 8.9 \%$$

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

La velocidad media de aumento de huella, WTS, entre los ciclos 5.000 y 10.000 (Pendiente) fue de 1.69mm/1000ciclos, el cual supera el mínimo exigido para un tipo de tránsito T2 de una capa de rodadura.

La relación porcentual de la profundidad de ahuellamiento para el ciclo de carga de 10.000 y el espesor medio de la probeta (PRD), arrojó un resultado de 8.9 % superando este al mínimo exigido para un tipo de tránsito T2 de una capa de rodadura.

El ahuellamiento obtenido en esta muestra podría derivar de varios factores que afectan a la estabilidad de la mezcla, como lo es en gran parte la cantidad de vacíos, este es denominado el parámetro volumétrico de mayor importancia para lograr mezclas estables y durables en el tiempo. Un incremento en el contenido de vacíos provoca un decremento en la resistencia de la mezcla a la generación de ahuellamientos [29].

Resultados de la máquina de ensayo – Muestra 2:

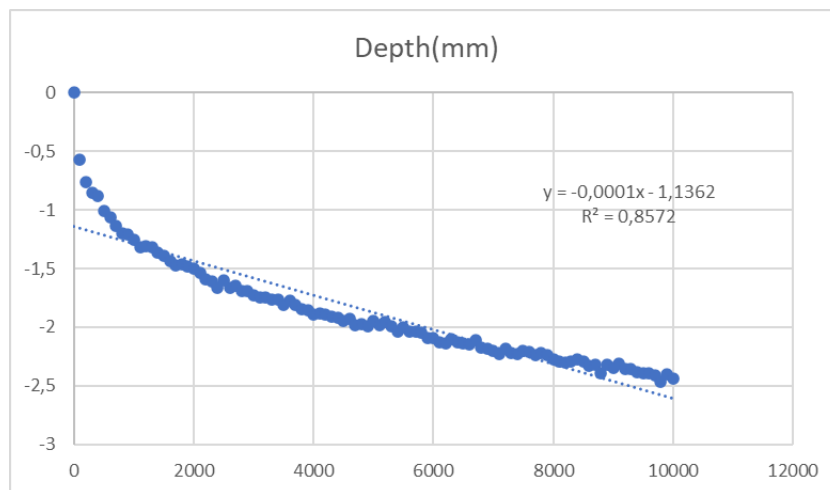


Figura 74 - (b) Gráficos resultantes del WTT de la probeta M2 con 5.4% de cap

Fuente: Software ECO+ Main Test [28], CDTV.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

A partir de los gráficos expuestos en Figura 74 fue posible aplicar las ecuaciones para hallar WTS y PRD se tienen los resultados

resultados:

$$D_{10000} = 2.44 \text{ mm}$$

$$D_{5000} = 1.95 \text{ mm}$$

La pendiente media de deformación (mm/1000 ciclos de carga):

$$w_{T_s} = \frac{D_{10.000} - D_{5000}}{5} \quad w_{T_s} = 0.10 \text{ mm/ciclos}$$

La profundidad media de la huella (%):

$$PRD = \frac{D_{10000}}{50} \quad PRD = 4.9 \%$$

Se observa que los resultados tanto en la pendiente WTS, entre los ciclos 5.000 y 10.000, como la profundidad de la huella, corresponden a un tráfico del tipo T2, también pudiendo corresponder a una clasificación del tipo T1.

La relación porcentual de la profundidad de ahuellamiento para el ciclo de carga de 10.000 y el espesor medio de la probeta (PRD), arrojó un resultado de 5% correspondiendo a un tráfico de clasificación tipo T2, para una carpeta de rodadura.

4.3.2.1 COMPARATIVA DE RESULTADOS DEL WTT

Para este trabajo final de grado nos enfocamos en variar el contenido de cemento asfáltico, conservando la misma estructura granular en ambas mezclas.

En la Tabla 58, se muestran los resultados de las mezclas con asfalto modificado tipo 3.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Tabla 58 - Comparativa de los resultados del WTT entre ambas mezclas.

Parámetros de	M1	M2	M1	M2
Diseño	5.51%	5.51%	5.4%	5.4%
Va (%)	4.13	5.27	7.83	4.96
GC (%)	100	99	96	99
WTS (mm/ciclos)	0.10	0.068	0.20	0.10
PRD (%)	6.4	5.0	8.9	4.19

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con el análisis del comportamiento de las mezclas asfálticas mediante la comparación de valores de WTS y ahuellamiento final, se determina que las mezclas asfálticas modificadas con polímeros con 5.51% y 5.4% de asfalto, brindan un buen comportamiento mecánico ya que no presentan deformaciones mayores, salvo una de las muestras que sobrepaso los limites ya que se compacto por debajo del límite mínimo exigido.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

5.1.1 EN CUANTO A LOS AGREGADOS GRUESOS Y FINOS

Los agregados seleccionados cumplen con todos los criterios exigidos por el Manual de Carreteras para ser utilizados en mezclas asfálticas, presentan una buena resistencia a la abrasión y al desgaste, además de que cuentan con un bajo índice de lajas y de elongación, aparte de ser resistentes a los ataques por sulfato y cumplir con los demás criterios tales como polvo adherido, plasticidad del material pasante del tamiz número 40, y equivalente de arena, por lo tanto son agregados ideales para utilizarlos en mezclas asfálticas.

5.1.2 EN CUANTO AL LIGANTE ASFÁLTICO

Con respecto al asfalto modificado utilizado cumplen con los criterios exigidos por el Manual de Carreteras del Paraguay para ser utilizados en mezclas asfálticas. Ambos presentan una adecuada penetración y viscosidad, es decir cumplen con las exigencias, estando estos cerca del mínimo. El asfalto modificado cuenta con una buena recuperación elástica torsional, además, los resultados del ensayo de envejecimiento también fueron favorables, demostrando de esta forma que los asfaltos seleccionados sean adecuados para realizar las mezclas asfálticas.

En cuanto a los ensayos volumétricos ambas mezclas se cumplieron el criterio de que $G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$.

Los valores de estabilidad y Fluencia del ensayo Marshall para ambas mezclas cumplieron con todos los requisitos establecidos.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

En este caso, se diseñó la mezcla con el método Marshall, y se evaluó la densificación con diferentes métodos de compactación, dado que el principal aspecto a tomar en cuenta el presente procedimiento, es obtener una mezcla asfáltica que se desempeñe adecuadamente y que además sea resistente a la deformación permanente (ahuellamiento).

La compactación giratoria podría generar mezclas con la misma densidad que con un martillo Marshall, pero la mezcla no es la misma ya que en el proceso de densificación tenemos dos factores:

1. Que tanto esta densificado es decir que gravedad específica logró.
2. Para un acomodo de las partículas va a ser diferente en una condición y otra con el martillo Marshall.

El diseñador de la mezcla debe preguntarse, si usara menos asfalto se podrá alcanzar los 4% de vacíos de aire para el N_{dis} , como también si podrían variar el VAM y las otras propiedades requeridas para mejorar los niveles aceptables. Para dar una respuesta a esta pregunta es un paso importante en el diseño de la mezcla, para cada prueba se calcula el contenido de ligante asfáltico estimado para alcanzar un 4% de vacíos de aire (96% de Gmm para el N_{dis}) empleando la formula empírica.

$$P_{bestimado} = P_{bi} - [0.4 * (4 - V_a)]$$

Donde:

$P_{bestimado}$: es el porcentaje de ligante estimado

P_{bi} : es el porcentaje inicial de prueba del ligante

v_a : es el porcentaje de vacíos de aire para N_{dis}

En lo que respecta al Wheel Tracking Test, se observó que los resultados de las mezclas de este ensayo cumplen con los requerimientos establecidos, presentan un buen comportamiento, por lo que son ideales para la utilización en zonas donde se tenga mucho tránsito y grandes sollicitaciones de carga.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

5.2 RECOMENDACIONES

Según el análisis y discusión de los resultados se pueden dar las siguientes recomendaciones:

- ❖ Evaluar mezclas asfálticas con menor contenido asfáltico, de modo a obtener más información sobre el desempeño de la mezcla respecto a la variación en la densificación y su susceptibilidad al ahuellamiento.
- ❖ Realizar el diseño de la selección del contenido óptimo de asfalto mediante el compactador giratorio.
- ❖ Evaluar el comportamiento de la volumetría al variar el contenido asfáltico.
- ❖ Realizar pistas de prueba con diferentes grados de compactaciones, así como en de forma a obtener límites de WTS y PRD que sean representativos en las cuales se pretenda realizar la construcción del pavimento flexible.
- ❖ Evaluar la cantidad de golpes para el diseño de tráfico pesado del Diseño Marshall a cuantos Giros representa el compactador giratorio.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

5.2.1 COMPARACIÓN DESDE EL PUNTO DE VISTA TÉCNICO – ECONÓMICO, LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

PORCENTAJE DE ASFALTO : 5.51

Distancia a Ejecutar 84.5 km

Cant. Ejecutada 80,562.3 tn

QUIINDY CREMA

MCA Mezcla de Concreto Asfáltico Polímero

Cod	Rubro	Un	DMT	Cantidad	Consumo	Rend tn/h	Unitario	Total	Incid
PA-04004	PLANTA ASFÁLTICA INOVA 80	Ton		80,562.30	1.0000		12,000	966,747,600	12,000
PC-05020	Pala Cargadora - LIEBHERR L-524	h		1,500.47	0.0186		233,310	350,075,318	4,345
ANDE	Consumo energia electrica	gl		53,708,202.69	666.6667		1	53,708,203	667
GASOIL	GASOIL	lts		112,787.22	1.4000		7,818	881,770,486	10,945
CAL	CAL HIDRATADA	kg		1,522.47	0.0189		900	1,370,220	17
CAP	C.A.P.	Ton		4,438.98	0.0551		8,050,217	35,734,774,236	443,567
FUELOIL	Fuel Oil	lts		604,217.25	7.5000		3,750	2,265,814,688	28,125
PTR4TA	Triturada 4ta	Ton		19,815.10	0.2460		46,387	919,163,197	11,409
PTR5TA	Triturada 5ta	Ton		12,940.96	0.1606		46,387	600,292,494	7,451
PTR6TA	Triturada 6ta	Ton		41,867.82	0.5197		46,387	1,942,122,775	24,107
1.111.111	Encargado de Planta asfáltica	mes		1.00	0.0000		4,500,000	4,500,000	56
2.222.222	Ayudante Planta Asfáltica	mes		1.00	0.0000		2,067,026	2,067,026	26
3.333.333	Calderista Planta asfáltica	mes		1.00	0.0000		2,548,000	2,548,000	32
Total Gs/tn								43,724,954,242	542,747

PORCENTAJE DE ASFALTO : 5.4

Distancia a Ejecutar 84.5 km

Cant. Ejecutada 80,562.3 tn

QUIINDY CREMA

MCA Mezcla de Concreto Asfáltico Polímero

Cod	Rubro	Un	DMT	Cantidad	Consumo	Rend tn/h	Unitario	Total	Incid
PA-04004	PLANTA ASFÁLTICA INOVA 80	Ton		80,562.30	1.0000		12,000	966,747,600	12,000
PC-05020	Pala Cargadora - LIEBHERR L-524	h		1,500.47	0.0186		233,310	350,075,318	4,345
ANDE	Consumo energia electrica	gl		53,708,202.69	666.6667		1	53,708,203	667
GASOIL	GASOIL	lts		112,787.22	1.4000		7,818	881,770,486	10,945
CAL	CAL HIDRATADA	kg		1,524.24	0.0189		900	1,371,815	17
CAP	C.A.P.	Ton		4,350.36	0.0540		8,050,217	35,021,375,839	434,712
FUELOIL	Fuel Oil	lts		604,217.25	7.5000		3,750	2,265,814,688	28,125
PTR4TA	Triturada 4ta	Ton		19,815.10	0.2460		46,387	919,163,197	11,409
PTR5TA	Triturada 5ta	Ton		12,956.03	0.1608		46,387	600,991,321	7,460
PTR6TA	Triturada 6ta	Ton		41,916.56	0.5203		46,387	1,944,383,686	24,135
1.111.111	Encargado de Planta asfáltica	mes		1.00	0.0000		4,500,000	4,500,000	56
2.222.222	Ayudante Planta Asfáltica	mes		1.00	0.0000		2,067,026	2,067,026	26
3.333.333	Calderista Planta asfáltica	mes		1.00	0.0000		2,548,000	2,548,000	32
Total Gs/tn								43,014,517,178	533,929

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

BIBLIOGRAFIA

- [1] MOPC, Galería, 2022. [En línea].
- [2] L. G. Loria, «Pavimento Flexible,» 2017. [En línea].
- [3] G. Thenoux y H. Carrillo, Análisis de ahuellamiento en mezclas asfálticas Chilenas., 2002.
- [4] J. B. Cepeda, Análisis del comportamiento de mezclas asfálticas a fisuración por fatiga mediante la aplicación de un nuevo ensayo dinámico a tracción directa, España: Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2002.
- [5] L. Borges, Tipos de ligantes asfáltucos, Brasilia, 2022.
- [6] e. a. BERNUCCI, Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros., 2008.
- [7] H. Rondón, F. Reyes, L. Gonzalez y S. Vásquez, Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas, Colombia, 2015.
- [8] A. Padilla, Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista., Barcelona, 2004.
- [9] Q. Sanfandila, «Influencia de la textura y la velocidad,» de *Publicación técnica* , 1998, p. N°111.
- [10] H. A. Rondón-Quintana, Estimación del uso de agua en el lavado de agregados pétreos., Colombia, 2015.
- [11] H. Delgado, P. Garnica y C. D. Sandoval, Análisis comparativo de los Métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas., Queretaro, 2005.
- [12] S. M. Design, «Asphalt Institute Superpave Series,» pp. No. 2 (SP-2), 1996.
- [13] M. d. C. d. Paraguay, Volumen II - Asfalto Tomo 6 - Normas para Materiales y Ensayos de Materiales., 2019.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

- [14] P. Garnica, H. Delgado y C. Sandoval, Aspectos del Diseño Volumetrico de Mezclas Asfálticas.
- [15] H. Gerald, Methods to Achive Rut-Resistant Durable Pavements., Washington: Academy Press, 1999.
- [16] I. P. B. Aurelio Ruiz Rubio, Influencia de los betunes en las deformaciones plásticas de las mezclas bituminosas: Estudio realizado por el Foro de los Ligantes Bituminosos, Madrid, 2002.
- [17] A. Institute, «The Asphalt handbook,» 2007.
- [18] B. J. Coree, Hot Mix Asphalt Volumetrics Revisited a New Paradigm., Washington, DC United States : Transportation Research Record No. 1681., 1999.
- [19] A. T. 85, «Specific Gravity of Coarse Aggregate».
- [20] N. A. T. Center, Background of Superpave Asphalt Mixtures Design and Analysis, SHRP-A-379, FHWA-SA-95-003., 1995.
- [21] M. A. Moreno, EFECTO DE LA PRESENCIA DE HUMEDAD EN EL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS SOMETIDAS A ENSAYO DE RUEDA DE CARGA (NORMA NLT-173/84), Santiago, 2011.
- [22] AASHTO, LRFD, 2004.
- [23] M. Sanchez y A. Arango, «Susceptibilidad a la humedad de mezclas asfálticas. "un caso particular", Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).,» 1999.
- [24] F. Morea, Materiales Viales Especiales, 2021.
- [25] F. Morea, Análisis del comportamiento al ahuellamiento de diferentes mezclas en los ensayos de rueda cargada según normas bs 598-110 y cen 12697-22..
- [26] J. Rivera, J. Bombelli y O. Rebollo, ESTIMACION DE LA PENDIENTE DE AHUELLAMIENTO EN EL ENSAYO DE WHEEL TRACKING TEST, La Plata, 2017.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

- [27] L. A. Mamani, Incidencias de la adición de Zeolita natural a la mezcla asfáltica en su comportamiento mecánico, 2018.
- [28] E. 12697-22, Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 22: Deformación en pista, España, 2022.
- [29] J. E. a. F. N. F. MONISMITH C. L., Improved Asphalt Mix Design, Proceedings, The, Williamsburg, Virginia,: Vol. 54., 1985.
- [30] H. Delgado, Diseño de mezclas asfálticas densas en caliente en función del nivel de tránsito., 2020.
- [31] H. D. Alamilla, P. G. Anguas, G. M. Villatoro y G. Rodriguez, «Influencia De La Granulometría En Las Propiedades Volumétricas De La Mezcla Asfáltica.,» Publicacion Técnica N°299, Sanfandila, Qro. 2006, 2006.
- [32] UTEST, «Equipo para ensayos de materiales,» [En línea]. Available: <https://www.utest.com.tr/es/26070/Aparato-Fraass-para-Punto-de-Rotura>.
- [33] A. Institute, SUPERPAVE Mix Design Series, Lexington: Asphalt Institute Research Center, 2001.

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

ANEXOS

1. AGREGADOS PÉTREO

1.1. COEFICIENTE DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES

Pasante Tamiz (m.m)	Retenido Tamiz (m.m)	Cantidad de la muestra %	Peso de la muestra gr.
19 m.m.	12.5	50.0	2,500
12 m.m.	9.5	50.0	2,500
Material Ensayado:	Tipo B	Peso Total	5,000
Cargas Abrasivas:	11	Giro del Cilindro	500 Vueltas

Perdida por Abrasion

$P = \frac{M - M_1}{M} * 100 =$	15.7%
---------------------------------	--------------

Donde: P= Perdida por abrasion
M= Masa de la muestra seca
M1= Masa del material retenido en el tamiz N° 12

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

1.2. PLASTICIDAD DE LA FRACCIÓN QUE PASA EL TAMIZ 425 µm

ENSAYO: LÍMITES DE ATTERBERG			FECHA:	27/02/2022
Metodo: VN - E2 - 65				
Progresiva:			POZO Nº:	
Muestra Nº:	Material triturada 6ta		Fecha de calib.:	
Sondaje Nº:			Profundidad:	
LÍMITE LIQUIDO				
	Capsula Nº		NO PLASTICO	
1	Número de Golpes	gr.		
2	Tara + Peso material húmedo	gr.		
3	Tara + Peso material seco	gr.		
4	Peso del Agua	gr.		
5	Peso de la Tara	gr.		
6	Peso material seco	gr.		
7	Húmedad	%		
8	Factor corrección			
9	Húmedad Corregida	%		
10	Húmedad Promedio	%		
LÍMITE PLASTICO				
	Capsula Nº		NO PLASTICO	
11	Tara + Peso material húmedo	gr.		
12	Tara + Peso material seco	gr.		
13	Peso del Agua	gr.		
14	Peso de la Tara	gr.		
15	Peso material seco	gr.		
16	Húmedad	%		
17	Húmedad Promedio	%		

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

1.3. RELACIÓN VÍA SECA – VÍA HUMEDAD DE LA FRACCIÓN QUE PASA EL TAMIZ IRAM 75 µM. AGREGADOS GRUESOS E INTERMEDIOS.

Norma: VN - E7 - 65

Identificación de la muestra: 4ta			
Tamaño nominal del agregado (mm):	19 mm		
Faja utilizada (mm):	19 mm a 4,75 mm		
Agregado Malla ASTM	Retiene o pasa	13,125.60	%
1" - 25 mm	Ret	0.00	
	Pas	13,125.60	100.0
3/4" - 19 mm	Ret	951.80	
	Pas	12,173.80	92.7
3/8" - 9,5 mm	Ret	11,849.40	
	Pas	324.40	2.5
Nº4 - 4,75 mm	Ret	234.50	
	Pas	89.90	0.7
Nº10 - 2 mm	Ret		
	Pas		
Nº40 - 0,425 mm	Ret		
	Pas		
Nº100 - 0,150 mm	Ret		
	Pas		
Nº200 - 0,075 mm	Ret		
	Pas		

Observaciones: Se ensaya si el pasante por el tamiz ASTM 0,075 vía húmeda es mayor del 5 %

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Norma: VN - E7 - 65

Identificación de la muestra: 5ta			
Tamaño nominal del agregado (mm):	12,5 mm		
Faja utilizada (mm):	12,5 mm a 4,75 mm		
Agregado Malla ASTM	Retiene o pasa	15,528.80	%
1" - 25 mm	Ret	0.00	
	Pas	15,528.80	100.0
3/4" - 19 mm	Ret	0.00	
	Pas	15,528.80	100.0
3/8" - 9,5 mm	Ret	4,761.40	
	Pas	10,767.40	69.3
Nº4 - 4,75 mm	Ret	10,280.30	
	Pas	487.10	3.1
Nº10 - 2 mm	Ret		
	Pas		
Nº40 - 0,425 mm	Ret		
	Pas		
Nº100 - 0,150 mm	Ret		
	Pas		
Nº200 - 0,075 mm	Ret		
	Pas		

Observaciones: Se ensaya si el pasante por el tamiz ASTM 0,075 vía húmeda es mayor del 5 %

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

1.4. GRAVEDADES ESPECÍFICAS Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO PÉTREO DE LOS AGREGADOS GRUESOS, INTERMEDIOS, FINOS Y FILLER.

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADO GRUESO AASTHO T 85-2000			
Descripción 4ta	Muestra 1	Muestra 2	Promedio
Temperatura del agua °C	25	25	
(A) Masa al aire de la muestra seca al horno , gr	2,843.20		
(B) Masa al aire de la muestra sss , gr	2,849.20		
(C) Masa aparente de la muestra saturada en agua , gr	1,771.01		
Gravedad especifica aparente , $Gsa=A/[A-C]$	2.652		2.652
Gravedad especifica bulk , $Gsb=A/[B-C]$	2.637		2.637
Gravedad especifica sss , $Gssss=B/[B-C]$	2.643		2.643
Absorción , $Abs=(B-A)/Ax100$, %	0.21		0.211

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADO GRUESO AASTHO T 85-2000			
Descripción 5ta	Muestra 1	Muestra 2	Promedio
Temperatura del agua °C	25		
(A) Masa al aire de la muestra seca al horno , gr	2,296.60		
(B) Masa al aire de la muestra sss , gr	2,302.70		
(C) Masa aparente de la muestra saturada en agua , gr	1,421.24		
Gravedad especifica aparente , $Gsa=A/[A-C]$	2.624		2.624
Gravedad especifica bulk , $Gsb=A/[B-C]$	2.605		2.605
Gravedad especifica sss , $Gssss=B/[B-C]$	2.612		2.612
Absorción , $Abs=(B-A)/Ax100$, %	0.27		0.266

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADO FINO AASTHO T 84-2000			
Descripción 6ta	Muestra 1	Muestra 2	Promedio
Temperatura del agua °C	25		
(A) Masa al aire de la muestra seca al horno , gr	509.5		
(B) Masa del picnómetro aforado lleno con agua , gr	1,282.20		
(C) Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno con agua	1,597.30		
(S) Masa de la muestra SSS , gr	514.70		
Gravedad especifica aparente , $Gsa=A/[B+A-C]$	2.621		2.621
Gravedad especifica bulk , $Gsb=A/[B+S-C]$	2.553		2.553
Gravedad especifica sss , $Gssss=S/[B+S-C]$	2.579		2.579
Absorción , $Abs=(S-A)/Ax100$, %	1.02		1.021

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE DEL RELLENO MINERAL VN - E15 - 89			
Descripción Cal hidratada	Muestra 1		Promedio
Temperatura del agua °C	20		
(A) Peso del Picnometro	261.51		
(B) Peso del Picnometro + Kerosene	1073.5		
(C) Peso del Picnometro + Material	811.99		
(D) Peso del Material	200.71		
(E) Peso del Picnometro + Kerosene + Material	1204.22		
(F) Peso del Picnometro + Agua	1286.81		
(G) Peso del Agua	1,025.30		
Factor de Correccion para 20°C	0.9982		
(H) Correccion por temperatura del agua 20°C	1,027.15		
Peso Especifico del Kerosene , [H/C]	0.79		
Peso Total , [B+D]	1,274.21		
Volumen de Peso Desplazado , E - [B+D]	69.99		
Volumen por Correccion (P.E.K) , [H/C]/E - [B+D]	88.54		
Gravedad especifica del relleno mineral	2.267		2.267

1.5. DURABILIDAD POR ATAQUE DE SULFATOS DE SODIO

Material que pasa el tamiz (mm)	Material que retiene el tamiz (mm)	Graduacion de la muestra original (%)	Masa de la fraccion antes del ensayo (gramos)	Masa que pasa el tamiz despues del ensayo (perdida real) %	Densidad (g/cm3)
19	9.6	90	1,000	1	0.90
				Total	0.90

Norma IRAM 1525 : el agregado grueso debe tener una perdida de masa menor o igual al 12%, luego de ser sometida a 5 ciclos alternados de inmersion y secado en una solucion saturada de sulfato de sodio

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

1.6 ÍNDICE DE LAJAS Y ELONGACIÓN

Masa Total		12258.7		INDICE DE LAJOSIDAD			INDICE DE ELONGACION		
CLASE GRANULOMETRICA	MASA RETENIDA EN CADA TAMIZ (gr)	PORCENTAJE DE PARTICULAS RETENIDAS EN CADA TAMIZ (Ri)	MASA TOTAL DE CADA FRACCION "i" ENSAYADA (mi) MAYOR DE 100 PARTICULAS (gr)	PARTICULAS ANALIZADAS QUE PASAN POR LA RANURA			PARTICULAS ANALIZADAS QUE NO PASAN POR ENTRE LAS BARRAS		
				MASA (mLi) (gr)	% (ILi)	IL = iLi x Ri	MASA (mEi) (gr)	% (IEi)	IE = IEi x Ri
63 mm - 50 mm (2 1/2" - 2")	0	0%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
50 mm - 37,5 mm (2" - 1 1/2")	0	0%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
25 mm - 22,4 mm (1" - 7/8")	0	0%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
22,4 mm - 19 mm (7/8" - 3/4")	313.5	3%	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0
19 mm - 12,5 mm (3/4" - 1/2")	5992.1	49%	3602.0	443.0	12	601	620.6	17.2	842
12,5 mm - 9,5 mm (1/2" - 3/8")	2838.5	23%	825.7	143.7	17	403	202.1	24.5	567
9,5 mm - 6,3 mm (3/8" - 1/4")	3114.6	25%	700.9	82.5	12	299	154.7	22.1	561
	$\sum R_i =$	100%			$\sum IL_i R_i =$	1303.2		$\sum IE_i R_i =$	1970
				$IL = \frac{\sum IL_i R_i}{\sum R_i} =$	13.0		$IE = \frac{\sum IE_i R_i}{\sum R_i} =$	19.7	

Observaciones: Porcentaje retenido menor al 5%, no se ensaya

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

1.7 MICRO DEVAL

Identificación de la muestra: Granito triturado(4ta)			
Tamaño nominal del agregado (mm):	19 mm		
Faja utilizada (mm):	19 mm a 12,5 mm		
Revoluciones:	12000		
Tamiz (mm)		Réplica 1	Réplica 2
Pasante	Retenido		
19	16	375.6	375.1
16	12.5	375.0	375.1
12.5	9.5	749.6	750.5
9.5	6.3		
6.3	4.75		
Masa de la carga abrasiva (g)		4,998.0	4,999.8
(A)Masa inicial de la muestra (g)		1,500.2	1,500.7
(B)Masa retenida en el tamiz N° 16 (g)		1,473.0	1,475.0
(C)Perdida de peso (g)		27.2	25.7
Desgaste Micro-Deval (%)		2%	2%
Desgaste Micro-Deval promedio (%)		2%	

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

1.8 POLVO ADHERIDO

Identificación de la muestra: 4ta			
Tamaño nominal del agregado (mm):	19 mm		
Faja utilizada (mm):	9,5 mm a 4,75 mm		
Solución:	Sulfato de aluminio al 2%		
Tamiz (mm)		Réplica 1	Réplica 2
Pasante	Retenido		
9.5	4.75	199.0	201.0
(A)Masa de la muestra[g]		199.0	201.0
(B) Lectura a las 24 hs [ml. %]		1.0	1.0
(P) Promedio de polvo adherido por cada 100 g de agregado [ml. %]		1.0	

Identificación de la muestra: 5ta			
Tamaño nominal del agregado (mm):	12,5 mm		
Faja utilizada (mm):	9,5 mm a 4,75 mm		
Solución:	Sulfato de aluminio al 2%		
Tamiz (mm)		Réplica 1	Réplica 2
Pasante	Retenido		
9.5	4.75	200.0	200.1
(A)Masa de la muestra[g]		200.0	200.1
(B) Lectura a las 24 hs [ml. %]		1.2	1.2
(P) Promedio de polvo adherido por cada 100 g de agregado [ml. %]		1.2	

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Identificación de la muestra: Granito triturado(5ta)			
Tamaño nominal del agregado (mm):	12,5 mm		
Faja utilizada (mm):	12,5 mm a 6,3 mm		
Revoluciones:	10500		
Tamiz (mm)		Réplica 1	Réplica 2
Pasante	Retenido		
19	16		
16	12.5		
12.5	9.5	750.1	750.4
9.5	6.3	375.00	375.20
6.3	4.75	375.00	375.30
Masa de la carga abrasiva (g)		4,999.7	4,999.1
(A)Masa inicial de la muestra (g)		1,500.1	1,500.9
(B)Masa retenida en el tamiz N° 16 (g)		1,420.1	1,421.2
(C)Perdida de peso (g)		80.0	79.7
Desgaste Micro-Deval (%)		5%	5%
Desgaste Micro-Deval promedio (%)		5%	

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

1.9 CUBICIDAD

GRADACION 25 m.m. - 19 m.m.

Norma: IRAM 1681

PROCEDENCIA DEL MATERIAL Cantera Consorcio Contec - Caapucu

Muestra N°: 4

Fracción	Pasante Tamiz Directriz	Retenido Tamiz	Peso Inicial gr.	AGREGADO RETENIDO POR LA CRIBA REDUCTORA				Peso de material retenido en el fondo gr.
				I Peso B gr.	R I Peso C %	II Peso D gr.	R II Peso E %	
2 B	25 m.m.	19 m.m.	3332.6	2949.2	88.5	835.2	25.1	
1 C	19 m.m.	16 m.m.	3102.1	2424.1	78.1	612.3	19.7	
2 C	16 m.m.	12,7 m.m.	2069.7	1590.7	76.9	393.7	19.0	
Total=				243.5		Total=	63.8	

Factor de Cubicidad:

$$F = \frac{RI + 1/2 RII}{100 \times n} = 0.92$$

Donde:

F= Factor de cubicidad

RI= Porcentaje de partículas retenidas en la criba reductora I

RII= Porcentaje de partículas retenidas en la criba reductora II

n= número de tamaño directriz correspondientes a la muestra analizada

1.10 ADHERENCIA LIGANTE Y AGREGADO

SERIE DE TAMICES: Pas. 3/8" a Ret. 1/4".		ADITIVO :	
DATOS		UN.	RESULTANTE
1	Peso del Agregado	gr.	100
2	Peso del Asfalto	gr.	5.5
3	Temperatura del Agregado para el Mezclado	° C	190
4	Temperatura del Asfalto para el Mezclado	° C	180
5	Cantidad de Aditivo	%	xxxxx
6	Peso del Aditivo	gr.	xxxxx
7	Fecha y Hora de Inicio de Inmersión		27/02 - 17:00
8	Fecha y Hora de Término de la Inmersión		28/02 - 11:00
9	Total de Tiempo de Inmersión	Horas	18
Resumen			
10	Porcentaje Apróx. Del Área de las Partículas del Agregado Desprendidas	3	%
11	Porcentaje Apróx. Del Área de las Partículas del Agregado Cubiertas	97	%

Resultado	Presenta Buena Adhesividad
Observación	No presenta desprendimiento en toda la superficie de la piedra

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

1.11 CARAS FRACTURADAS

Identificación de la muestra: 4ta			
Tamaño nominal del agregado (mm):	19 mm		
Faja utilizada (mm):	19 mm a 4,75 mm		
Tamiz (mm)		Réplica 1	Réplica 2
Pasante	Retenido		
25	19	44.2	40.1
19	12.5	2,313.4	2,319.0
12.5	9.5	790.3	740.4
9.5	4.75	341.2	330.0
(A) Masa inicial de la muestra(g)		3,489.1	3,429.5
(F) Masa de partículas con dos o más caras fracturadas (g)		3476.8	3,419.5
(U) Masa de partículas con una cara fracturada (g)		12.3	10.0
(N) Masa de partículas sin caras fracturadas (g)		0.0	0.0
(P2) Partículas con dos o más caras (%)		99.6%	99.7%
(P2) Partículas con dos o más caras fracturadas (%)		0.4%	0.3%
(P1) Partículas con una cara fracturada (%)		0%	0%
(P2) Promedio de partículas con dos o más caras fracturadas (%)		99.7%	
(P1) Promedio de partículas con una cara fracturada (%)		0.32%	

1 CARA	2 o mas CARAS	1 CARA	2 o mas CARAS
0.00	44.20	0.00	40.10
9.50	2303.90	5.00	2314.00
0.00	790.30	0.00	740.40
2.80	338.40	5.00	325.00
	3,476.8		3,419.5
12.3		10.0	

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

1.12 EQUIVALENTE DE ARENA

MATERIAL Triturada 6ta

Fecha	Origen de la Muestra	Cantidad Muestra	Lectura Superior (Arcilla)	Lectura Inferior (Arena)	% E/A	Observación
27/12/2021	Cantera del Consocio Contec	155.3	14.2	10.4	73.2%	73%
27/12/2021	Cantera del Consocio Contec	155.8	14.6	10.8	74.0%	74%
						Promedio: 74

1.13 CONCENTRACIÓN CRÍTICA

CONCENTRACIÓN CRÍTICA Cs		
	Filler de PT 6ta	Filler de Cal
Peso(gr)	6.7	2.5
Volumen(cm ³)	9.5	9.5
Conc. Crít.(Cs)	0.27	0.12

Tipo de Aridos	% Incid.	Pasa # 200 (%)	% Aporte # 200 a	G.E.A. (gr/cm ³) b	G.E.A. prop. a / b c	Conc. Crít. (Cs) d	b x d e	V' a / e f
0-6	40.0	8.30	3.32	2.591	1.28	0.27	0.71	4.68
Cal	1.0	92.3	0.92	2.283	0.40	0.12	0.26	3.54
TOTAL	41.00		4.24		1.68			8.22

G.E. Filler Total = % Aporte total / G.E.A. prop. total =	2.520
---	-------

Cs del Filler total = % Aporte total / (V' total * G.E.A. prop. total) =	0.2
--	-----

Cs=	0.20
0.20	"<" 0.22
	<i>ok</i>

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Composición:	Árido	94.49
	Asfalto	5.51
	Gb	1.009

Aporte de Filler (%) = % de AporteTotal x % en la composición =	4.01
Volumen de Filler = Aporte de Filler(%) / P.E.Filler total =	1.59
Volumen de Cap = Aporte de Cap(%) / P.E.Asfalto =	5.46
Concentración volumétrica Cv = Vol. Filler / (Vol. Filler + % Asfalto) =	0.20

Cv=	0.20
cv/cs=	1.00
1	"<" 1
	ok

RELACIÓN Cv / Cs =	1.0
	1.0 "<" 1
	ok

2. CEMENTO ASFÁLTICO.

2.1 PENETRACIÓN A 25°C

Identificación de la muestra: CAP con Polimero AM3 - Residuo			
Temperatura de Ensayo (°C)	25 °C		
Carga de Aguja (gr)	100		
Tiempo (sg)	5 sg		
Descripcion	Punto 1	Punto 2	Punto 3
Penetracion (0,1 mm)	43	42.0	42.0
Penetracion promedio (0,1 mm)	42		
Diferencia entre valore extremos (0,1mm)	1		
Descripcion	Original	Residuo	
Penetracion (0,1 mm)	60	42	
Diferencia de Penetracion (0,1 mm)	18.0		
Penetracion residual (%)	70.0		
Penetracion residual limite (%)	65.0		

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.2 PUNTO DE INFLAMACIÓN Y FULGOR

PROVEEDOR: ALDIA S.A
TIPO DE ASFALTO: TIPO AM3 50/70 ASFALTO MODIFICADO CON POLIMEROS

MUESTRA:	FULGOR	INFLAMACION	UNIDAD	RANGO DE FULGOR
PUNTO 1:	288	300	°C	235 min.
PUNTO2:				

2.3 PUNTO DE ABLANDAMIENTO

Identificación de la muestra: CAP con Polimero AM3 - Residuo		
Tipo de baño:	Agua	
Descripcion	Anillo 1	Anillo 2
Punto de ablandamiento (°C)	80	80.0
Punto de ablandamiento promedio (°C)	80	
Diferencia entre punto de ablandamiento (°C)	0.0	
Descripcion	Original	Residuo
Punto de ablandamiento (°C)	71	80
Diferencia entre punto de ablandamiento R-O (°C)	9.0	
Punto de ablandamiento residual límite (°C)	menos 5 a 10 °C	

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.4 VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD A 135°C, 155°C, 170°C Y 190°C

Spindle Nº	27	
Viscosidad Rotacional a 60 °C		
Viscosidad Rotacional a 135 °C	1.54	Pa-s
Viscosidad Rotacional a 150 °C	0.69	Pa-s
Viscosidad Rotacional a 170 °C	0.32	Pa-s
Viscosidad Rotacional a 190 °C	0.16	Pa-s

2.5 PESO ESPECIFICO

GRAVEDAD ESPECIFICA DE CAP ASTM D 70			
Descripción Cap con polimero am3	Muestra 1	Muestra 2	Promedio
Temperatura del agua °C	25		
(A) Masa picnometro 25 ml , gr	29.53		
(B) Masa picnometro 25 ml+ masa agua , gr	57.47		
(C) Masa picnometro+Cap , gr	50.46		
(D) Peso Cap gr	20.93		
(E) Peso Total gr, [D+B]	78.4		
(F) Peso Final gr	57.66		
(G) Peso Desplazado gr, [E-F]	20.74		
(H) Correccion por temperatura	0.99713		
(I) Volumen cm3 , [G/H]	20.800		
(J) Gravedad especifica del cap gr/cm3, [D/G]	1.009		1.009

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.6 ENSAYO DE LA MANCHA



Modificado tipo 3
Negativo

2.7 DUCTILIDAD A 25°C

DUCTILIDAD A 25°C
>100 cm

2.8 RECUPERACIÓN ELÁSTICA TORSIONAL A 25°C

Resultado : 73 %

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL ANALIZANDO LA DENSIFICACION DE LA MEZCLA Y SU EVALUACIÓN A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.9 VARIACIÓN DE MASA %

Identificación de la muestra: CAP modificado con polimero AM3		
Temperatura de ensayo (°C):	163 °C	
Flujo de aire (l/min)	4 l/min	
Tiempo(min):	85 min	
Descripción	Muestra 1	Muestra 2
(A) Masa del frasco (g)	161	159
(B) Masa inicial del frasco+material (g)	196.4	194.9
(C) Masa inicial material (g)	35.3	35.5
(D) Masa final del frasco+material (g)	196.1	194.6
(E) Masa final del material (g)	35.1	35.3
(F) Pérdida de masa (g)	-0.2803	-0.2711
Pérdida RTFOT [%]	-0.799%	-0.769%
Pérdida RTFOT promedio [%]	-0.7843%	
Pérdida RTFOT limite [%]	± 1%	