

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

**VERIFICACIÓN DE LA ASTM INTERNACIONAL
D6926-10 SIMULANDO LA PRODUCCIÓN DE MEZCLAS
TIPO M-12 HASTA EL MOMENTO DE SU COLOCACIÓN**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR: Cheng, Kinlay

Sanz, Ingrid

PROFESOR GUÍA: MSc. Brito, María

FECHA: Junio 2013

DEDICATORIA

A mí misma,

A mis padres,

A mis Hermanos,

Que a pesar de la distancia siempre han estado ahí.

Kinlay.

A mí misma,

A mi madre,

A mi abuela,

Gracias por tus años de sacrificio y dedicación.

Ingrid.

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres por su paciencia y apoyo incondicional en todas las etapas de nuestras vidas.

A nuestra Profesora y Tutora María Eugenia Brito, que a pesar de las dificultades y tropiezos siempre nos apoyó y brindó sus conocimientos.

A la Constructora ARPIGRA, en especial al Ing. José De Freitas y al Sr. Orangel por apoyarnos en este trabajo de investigación.

A nuestros amigos, Carlos Frade y Jesús Vidao por sus horas de compañía, apoyo y momentos inolvidables, durante esta etapa de nuestras vidas.

A los Profesores María Barreiro y Padrino Ricardo Rivas por su guía y palabras de aliento en el momento indicado.

¡Muchísimas Gracias!

RESUMEN

El presente Trabajo Especial de Grado, es una investigación del tipo experimental que se basa en evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente (MAC), tipo M-12, cuando se ensaya a cero (0) tiempo hasta cuatro (4) horas de curado. A través de un simulador en laboratorio.

Se comparan los valores obtenidos como producto de los ensayos RICE, siguiendo el procedimiento normalizado ASTM D2041/D2041M-11, incluyendo diferentes tiempos de curado aplicados a la MAC. Se estudió la incidencia del tiempo de curado en las propiedades MARSHALL, para lo que se usaron dos (02) diseños de mezcla tipo M-12, con agregado de cantera y de mina, de acuerdo a las Especificaciones SUPERPAVE®. Para ambos diseños se utilizó asfalto A-30 y se calculó el porcentaje óptimo de asfalto con el “Calculador del Polígono de Vacíos” de la Metodología RAMCODES®.

En esta investigación se registra, que el porcentaje de absorción de los agregados que conforman la MAC, incide directamente en los Vacíos Totales (V_t) en campo, sobrepasando el máximo que recomienda el Instituto Americano de Asfalto (IDA) en su publicación MS-22 (8%). Se muestra que las propiedades de la MAC varían notablemente cuando se hace el respectivo curado, incrementándose los V_t y con ello generando condiciones muy distintas.

Palabras Claves: Mezcla Asfáltica en Caliente, propiedades MARSHALL, Ensayo RICE, tiempo de curado, vacíos totales en campo

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO I.....	8
1.1 Planteamiento Del Problema.....	9
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo General	12
1.2.2 Objetivos Específicos	12
1.3 Justificación.....	12
1.4 Limitaciones y alcances	13
1.4.1 Limitaciones.....	13
1.4.2 Alcances	13
CAPÍTULO II	15
MARCO TEÓRICO.....	15
2.1 Antecedentes	15
2.2 Bases Teóricas.....	17
El Asfalto	17
Refinación Del Petróleo	17
Tipos De Asfalto	18
Propiedades Químicas del Asfalto	21
Propiedades Físicas del Asfalto.....	22
Los Agregados	26
Clasificación de los agregados	26
Tipos de agregados para las mezclas asfálticas.....	28
Propiedades y características físicas del agregado	29

La Mezcla Asfáltica	39
Características y comportamiento de la mezcla	40
Propiedades Consideradas en el Diseño de Mezcla	44
Métodos de Laboratorio para el diseño de la MAC	50
El Método MARSHALL	51
El Método RAMCODES®.....	57
CAPÍTULO III	61
3.1 Tipo de Investigación.....	61
3.2 Diseño de la Investigación	62
3.3 Etapas de la Investigación.....	63
3.4 Población y Muestra.....	64
3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	65
3.6 Técnicas de Análisis e Interpretación de Datos.....	67
3.6.1 Etapas del experimento	67
3.7 Confiabilidad y Validez	75
CAPITULO IV	77
4.1 Diseño de la Estructura Granulométrica tipo M-12, utilizada para ambos tipos de agregados	77
4.2 Pesos Específicos de los Agregados.....	78
4.2.1 Peso Específico de Agregados de Cantera	78
4.2.2 Peso Específico de Agregados de Mina	81
4.3 Diseño de las Mezclas según la Metodología RAMCODES®.	84
4.3.1 Diseño de las mezclas según la Metodología RAMCODES® para los Agregados provenientes de Cantera	84
4.3.1.1 Densidad Máxima Teórica (valor RICE)	84
4.3.1.2 Metodología RAMCODES® para obtener el cemento óptimo de asfalto	86
4.3.1.3 Ensayo MARSHALL para los Agregados de Cantera de la Mezcla No Curada	88

4.3.2 Diseño de las mezclas según la Metodología RAMCODES® para agregados proveniente de Mina.	89
4.3.2.1 Densidad Máxima Teórica con Agregado de Mina (valor RICE)	89
4.3.2.2 Metodología RAMCODES® para obtener el cemento óptimo de asfalto del Agregado proveniente de Mina.	91
4.3.2.3 Ensayo MARSHALL para Agregado de Mina de la Mezcla No Curada.....	93
<i>4.4 Diseño de las mezclas según la metodología MARSHALL con la inclusión del tiempo de curado</i>	94
<i>4.4.1 Ensayo RICE para la Mezcla Curada</i>	94
4.4.1.1 Ensayo RICE para la Mezcla Curada con Agregados provenientes de Cantera	94
4.4.1.2 Ensayo Rice para Mezcla Curada con agregados provenientes de Mina	96
4.4.2 Ensayo MARSHALL para las Mezclas Curadas.....	98
4.4.2.1 Ensayo MARSHALL con Agregados de Cantera de la Mezcla Curada.	98
4.4.2.2 Ensayo MARSHALL para agregados de Mina de la Mezcla Curada	99
CAPITULO V	105
CONCLUSIONES	105
CAPITULO VI.....	106
RECOMENDACIONES	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
ANEXOS.....	108
ANEXO A: GLOSARIO.....	109
ANEXO B: SIGLAS	110
ANEXO C: Factores de corrección de la estabilidad leída en briquetas elaboradas siguiendo el Método MARSHALL de diseño de mezclas.....	112
ANEXO D: MEMORIA FOTOGRAFICA.....	113
Granulometría de los agregados y Peso Especifico.....	113
Ensayo RICE.....	115
Ensayo MARSHALL	118

ANEXO E: NORMAS ASTM 120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Temperaturas aproximadas de separación del crudo. 19
 Figura 2: Variación de viscosidad con temperatura de dos asfaltos graduados por penetración. 23
 Figura 3: Variación de viscosidad con temperatura de dos asfaltos graduados por viscosidad. 24
 Figura 4: Viscosidad de un asfalto original y envejecido. 25
 Figura 5: Tipos de pesos específicos..... 38
 Figura 6: Ilustración de VMA en una probeta de mezcla compactada..... 42
 Figura 7: Polígono de Vacío..... 59
 Figura 8: Polígono de vacío con Centroide..... 59

LISTA DE GRÁFICA

Gráfico 1: Estructura Granulométrica utilizada para los diferentes tipos de agregados 77
 Gráfico 2: Densidad Máxima Teórica con agregado de Cantera para los diferentes porcentajes de cemento asfáltico..... 86
 Gráfico 3: Generada por el Método RAMCODES® para agregados provenientes de Cantera 87
 Gráfico 4: Densidad Máxima Teórica del Agregado de Mina para los diferentes porcentajes de cemento asfáltico..... 91
 Gráfico 5: Generada por el método RAMCODES® para los Agregados provenientes de Mina..... 92
 Gráfico 6: Aumento proporcional de la Densidad Máxima Teórica a medida que va aumentando el tiempo de los Agregados provenientes de Cantera. 95
 Gráfico 7: Aumento proporcional de la Densidad Máxima Teórica a medida que va aumentando el tiempo de curado de los Agregados provenientes de Mina..... 97
 Gráfico 8: Relación de la Densidad de los Agregados provenientes de Cantera “Las Marías” 101
 Gráfico 9: Relación de la Densidad de los Agregados provenientes de “Minas de Cascabel” 101
 Gráfico 10: Variación RICE curado y sin curar con el 97% de vacíos totales en campo de los Agregados provenientes de Cantera “Las Marías”..... 102
 Gráfico 11: Variación RICE curado y sin curar con el 97% de vacíos totales en campo de los Agregados provenientes de “Las Minas de Cascabel” 103

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Especificación COVENIN 1670:2007 para cementos asfálticos de pavimentación	20
Tabla 2: Tamaños típicos de tamices	30
Tabla 3: Tipos y límites granulométricos de las mezclas asfálticas	33
Tabla 4: Valores mínimos para ensayo equivalente de arena.....	34
Tabla 5: Valores permitidos del ensayo ASTM C131	34
Tabla 6: Porcentaje en peso de las caras producidas por fractura, según Método COVENIN 1124	35
Tabla 7: Criterios en cuanto a la Angularidad de los finos	36
Tabla 8: Porcentajes mínimos de Arena Natural.....	36
Tabla 9: Causas y efectos de una estabilidad baja.....	45
Tabla 10: Causas y efectos de una poca durabilidad.....	46
Tabla 11: Causas y efectos de la Permeabilidad	47
Tabla 12: Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad	48
Tabla 13: Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga	49
Tabla 14: Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento.....	50
Tabla 15: Especificaciones según tipo de tránsito.....	54
Tabla 16: Cantidad de muestra para Ensayo RICE, según TNM.....	55
Tabla 17: Propiedades MARSHALL exigidas para el diseño de mezclas en laboratorio	56
Tabla 18: Valores de vacíos en el agregado mineral (VAM), en función de la TNM del agregado y del % de vacíos totales de la mezcla	57
Tabla 19: Distribución para la realización del ensayo peso específico retenido en #8	69
Tabla 20: Distribución para la realización del ensayo peso específico pasante #8 retenido en #200	69
Tabla 21: Distribución para la realización del ensayo peso específico pasante #200	70
Tabla 22: Distribución para la realización del ensayo RICE	70
Tabla 23: Distribución para la realización del ensayo MARSHALL.....	71
Tabla 24: Peso Específico para Agregado Grueso (Retenido en el tamiz #8).....	78
Tabla 25: Peso específico para Agregado Fino (Pasante #8 retenido en #200)	79
Tabla 26: Peso Específico para Agregado Fino (pasante #200).....	80
Tabla 27: Resumen de los pesos específicos promedios de los Agregados provenientes de Cantera	80
Tabla 28: Peso específico para Agregado grueso (Retenido en el tamiz #8)	81
Tabla 29: Peso Específico para Agregado Fino (Pasante #8 retenido en #200).....	82
Tabla 30: Peso específico para Agregado Fino (Pasante #200)	83
Tabla 31: Resumen de los pesos específicos promedios de los Agregados provenientes de Mina...	83
Tabla 32: Resultados de Densidad Máxima Teórica (valor RICE).....	84
Tabla 33: Resultados promedio de Ensayo RICE para Agregado de Cantera.....	85

Tabla 34: Resultados del método RAMCODES® para los agregados de Cantera	87
Tabla 35: Resultados Ensayo MARSHALL de la Mezcla No curada.....	88
Tabla 36: Propiedades MARSHALL comparadas con el criterio de la Norma INVEAS (aprobada por FONDONORMA), Briqueta No curada con un porcentaje óptimo de asfalto de 5,24%.	88
Tabla 37: Resultados de Densidad Máxima Teórica (valor RICE)	89
Tabla 38: Resultados promedios del Ensayo Rice de los agregados de Mina.....	90
Tabla 39: Resultados del método RAMCODES® para los agregados de Mina	92
Tabla 40: Resultados del ensayo MARSHALL de la Mezcla No Curada.	93
Tabla 41: Propiedades MARSHALL comparadas con el criterio de la Norma INVEAS (aprobada por FONDONORMA) Briqueta no curada con un porcentaje óptimo de asfalto de 6,04%.	93
Tabla 42: Densidad Máxima de la mezcla (valor de RICE) para los diferentes tiempos de curado .	94
Tabla 43: Densidad Máxima de la mezcla (valor de Rice) para los diferentes tiempos de curado ...	96
Tabla 44: Resultados del Ensayo MARSHALL de la Mezcla Curada.....	98
Tabla 45: Propiedades MARSHALL comparadas con el criterio de la Norma INVEAS (aprobada por FONDONORMA), Briqueta Curada con un Contenido Óptimo de Asfalto de 6,04%	98
Tabla 46: Resultados Ensayo Marshall de la Mezcla Curada	99
Tabla 47: Propiedades MARSHALL comparadas con el criterio de la Norma INVEAS (aprobada por FONDONORMA), Briqueta Curada con un contenido óptimo de asfalto de 6,04%	99
Tabla 48: Comparación de las propiedades MARSHALL de la mezcla curada con la mezcla no curada	100
Tabla 49: Resumen Porcentajes de vacíos totales en campo.....	102

INTRODUCCIÓN

La metodología MARSHALL desde hace más de 40 años, se ha ido revisando y actualizando, de acuerdo a las condiciones estipuladas por la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM), revisión que se hace exactamente cada dos (02) años. Es un método que se viene usando en Venezuela desde 1960 aproximadamente; a pesar de que su actualización fue suspendida por un lapso de tiempo, por nuevas investigaciones (SUPERPAVE), nuevamente ha sido considerado, como método único, al menos por ahora para definir los diseños de mezcla asfáltica.

Desde su creación se había mantenido la teoría de realizar muchos de los ensayos inmediatamente después de la fabricación de la mezcla asfáltica para determinar los valores de: Densidad, Estabilidad y Flujo MARSHALL, sin embargo para el año 2010, ASTM publica bajo el código 6926-10, donde señala como requisito el curado de la mezcla asfáltica antes de realizar las briquetas que a su vez arrojan la Densidad MARSHALL, exigencia que en Venezuela ya se manejaba desde el año 2006, aunque aún no es considerada su aplicación.

ASTM D6926 en su versión del año 2010 establece que la mezcla debe ser colocada en el horno en un recipiente metálico cubierto a una temperatura entre 8°C a 11°C por encima de la temperatura de compactación por un tiempo mínimo de 1 hora y un máximo de 2 horas.

Aunque el Método MARSHALL exige el curado de la mezcla, aún no se ha pronunciado ningún tipo de modificación para el ensayo RICE. La Norma ASTM D2041 indica que inmediatamente después de fabricar la MAC se deja enfriar la mezcla y se procederá a realizar el Ensayo.

Debido a que existen ciertos aspectos no aclarados en los recientes requisitos por parte de ASTM, como el de considerar la modificación en el ensayo del RICE, precisar bajo qué condiciones el tiempo de curado, y aclarar la temperatura para el curado. Por tal razón, en este trabajo especial de grado, se plantea utilizar la temperatura de mezclado para realizar el curado de la mezcla asfáltica en caliente (MAC) y evaluar su comportamiento para tiempos mayores de 2 horas, ya que, se estima que, dependiendo del tipo de agregado y de la logística en obra, han de existir variaciones.

En base al planteamiento expuesto, se realiza una serie de ensayos en laboratorio que definen este estudio del tipo experimental. La MAC será sometida a diferentes tiempos de curado, dentro de un cajón de latón o simulador, para determinar las posibles variaciones que pueda presentarse en la mezcla con el incremento del tiempo, a partir de cero (0) hasta cuatro (4) horas. También se analiza ¿cómo afectan estos resultados en la obtención del contenido óptimo del cemento asfáltico? y si estos valores entran dentro del valor recomendado.

La investigación está estructurada de la siguiente forma:

- Capítulo I: Planteamiento del problema, Objetivos Generales y Específicos, Justificación del Problema, Limitaciones y Alcance.
- Capítulo II: Antecedentes y Base Teórica que sustenta la investigación.
- Capítulo III: Marco Metodológico, contempla el camino a seguir para el desarrollo de la Investigación, metodología empleada con el fin de realizar los pasos necesarios para poder alcanzar los objetivos planteados.
- Capítulo IV: Presentación y Análisis de Resultados, evaluando en detalle cada resultado obtenido.
- Capítulo V: Conclusiones de la investigación.
- Capítulo VI: Recomendaciones que pudieran ser aplicadas en un futuro.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento Del Problema

La necesidad de comunicación con otras regiones y el aumento del tamaño de las poblaciones obligó a buscar y ampliar diferentes medios de transporte terrestre para alimentos, materias primas, equipos; establecer rutas comerciales, entre otras alternativas. A partir de ese momento se comienzan a construir las primeras carreteras, siendo éste uno de los principales hitos de la ingeniería.

Con el pasar de los años y tras el desarrollo de la industria petrolera fueron mejorando las técnicas constructivas y se diseñaron controles de calidad más precisos para las mezclas asfálticas obteniendo lo que hoy en día se conoce como Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC), dándole a la estructura vial un mayor confort, mejor desplazabilidad y rapidez de construcción.

A pesar de los múltiples avances en el área de pavimento, en Venezuela las vías de comunicación terrestre siguen siendo las mismas, desde hace más de 20 años. El crecimiento vehicular se ha multiplicado y se dispone de pocos datos estadísticos que nos permitan precisar con una mayor exactitud las cargas a las que son sometidas las vías; eso, sin mencionar la ineficiencia que existe con respecto a la importancia y necesidad de realizar un buen mantenimiento, con el fin de preservar la vida útil y asegurar el funcionamiento de las mismas.

Pareciera, que todos estos factores han obligado a ser cada vez más precisos y exigentes a la hora de diseñar la MAC, así como también a ser cuidadosos con los ensayos de laboratorio, debido a que éstos simulan todo el proceso de producción, colocación y condiciones a las que estará sometida la misma. Esto ha motivado el desarrollo de múltiples

líneas de investigación destinadas a precisar los factores que podrían estar afectando a las mezclas.

Dependiendo de las exigencias del proyecto vial, del tipo de agregado, cemento asfáltico e importancia de la obra; se debe diseñar una MAC que cumpla los criterios establecidos en las Normas y para ello se usa como herramienta, con el fin de satisfacer los requisitos que estas contienen, el Ensayo RICE (ASTM D2041), el Método MARSHALL (ASTM D1559) y la Norma del Instituto Venezolano del Asfalto (INVEAS), esta última aprobada parcialmente por el Fondo para la Normalización y Certificación de la Calidad (FONDONORMA). La norma INVEAS del 2004 recomienda que, después de compactada la mezcla se debe tomar núcleos de la capa colocada. El promedio de las densidades de las muestras debe ser: a) el 93% con respecto a la Densidad Máxima Teórica ó b) el 97% de la densidad Marshall.

La norma ASTM D6926-10 (Ensayo estándar para la preparación de muestras bituminosas a ser utilizadas en el Aparato Marshall) simula en laboratorio el proceso de fabricación, traslado y compactación de la mezcla, resaltando el punto 5.3.2 de dicha norma que establece: “Condición de lotes individuales en recipientes metálicos cubiertos en un horno a una temperatura de 15° F (8 °C) a 20 °F (11 °C) por encima la temperatura de compactación establecido, en 5.2 para un mínimo de 1 h y un máximo de 2 h”. (ASTM Internacional, 2010, p. 5). Al Analizar este punto de la norma; surge la curiosidad de ¿Qué puede ocurrir en la mezcla si se simula en laboratorio el proceso de fabricación de la MAC desde que sale en planta hasta su colocación en campo?, observando específicamente el tiempo de 3 a 4 horas que permanece en la tolva del camión; para lo que se diseñó una caja de latón completamente sellada (simulador), que simulará la tolva y que será sometida a los efectos del calor en el horno para mantener la temperatura de la mezcla.

Cuando la planta de asfalto no se encuentre cercana a la obra, durante el transporte de la MAC, puede ocurrir que la mezcla permanezca más de 2 horas en la tolva del camión, se presume que desde la carga de la MAC a la tolva del camión en planta hasta su colocación en obra, los poros de los agregados que quedaron total o parcialmente vacíos podrían continuar absorbiendo cemento asfáltico lo que podría generar que el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla en campo sea mayor a 8%, según lo que recomienda el manual “Principios de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente” del Instituto Americano de Asfalto (IDA) en su publicación MS-22 que indica: ”El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 %, dependiendo del diseño específico.” (IDA, 1992, p. 58); si el planteamiento presentado resultara cierto, los pavimentos flexibles tendrían un alto contenido de aire, ésto trae como consecuencia que aumente la probabilidad de infiltración del agua a la mezcla, lo cual provocaría la separación de la película de asfalto de los agregados, disminución de la estabilidad, beneficiando el proceso de envejecimiento del asfalto, acelerando así el deterioro del pavimento.

Adicionalmente, si ocurre dicha absorción de asfalto en la mezcla, pudiera afectar el valor de porcentaje óptimo de asfalto utilizado en la preparación de la MAC, calculado en laboratorio mediante el Método MARSHALL, alterando sus propiedades volumétricas.

Por estas razones es importante precisar el tiempo que requieren (tiempo de curado) los agregados en una mezcla para absorber el cemento asfáltico surgiendo así las siguientes incógnitas:

1. ¿Serán iguales los valores de Densidad Máxima Teórica (Ensayo RICE) al someter la mezcla a distintos tiempos de curado?
2. ¿Qué diferencia existe entre el curado de la MAC de cero (0) hora a dos (2) horas, inclusive a cuatro (4) horas?

3. ¿Afectará significativamente las propiedades de la MAC al curarla por más de dos (2) horas?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la norma ASTM D6926-10, simulando en laboratorio la fabricación de dos MAC tipo M-12 con agregados provenientes de cantera y mina, aplicando desde cero (0) hasta cuatro (4) horas como tiempo de curado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar los porcentajes óptimos de asfalto con el Método RAMCODES® para dos (02) diseños de MAC tipo M-12, con agregados provenientes de cantera y mina.
- Calcular los valores de Densidad Máxima Teórica (DMT) aplicando el método, según ASTM D2041/D2041M-11 para los dos diseños de MAC, incluyendo los distintos tiempos de curado.
- Comparar los valores de la DMT con los resultados obtenidos, al incrementar el tiempo de curado del diseño MAC con los 2 tipos de agregados.
- Analizar el efecto del tiempo de curado en la MAC, comparando las propiedades MARSHALL.

1.3 Justificación

Toda mezcla asfáltica está compuesta por asfalto y agregados. Estos últimos por naturaleza poseen poros a través de los cuales absorben cierta cantidad de agua y asfalto; se presume, que varía en mayor o menor medida del tiempo al que sean expuestos y del tamaño de los orificios. Si, cuando se hace el diseño de mezcla o las rutinas diarias de ensayo en el laboratorio, no se consideran los procedimientos adecuados, tal cual como lo rigen las normas, como es, el proceso de fabricación hasta la colocación, los resultados que

se obtendrían no serían confiables, acarreado así valores y parámetros incorrectos de la MAC, lo que produciría variaciones no controladas de las propiedades, y con ello poca garantía en su durabilidad.

Con el fin de evaluar hasta qué punto es aplicable la nueva exigencia de la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (ASTM), de hacer curado de la MAC entre 1 y 2 horas, se simulará en laboratorio las condiciones a que ésta es sometida desde su fabricación hasta su colocación, para observar sus tendencias y respectivas tolerancias según la Norma del INVEAS, aprobada parcialmente por FONDONORMA.

1.4 Limitaciones y alcances

1.4.1 Limitaciones

Para cualquier investigación que se desee realizar se necesita de una gran cantidad de antecedentes que permitan un mejor desarrollo de la misma. En Venezuela se han realizado pocos trabajos de investigación referente al tiempo de curado de la MAC y los que existen tienen una data de más de 5 años. Por lo que en esta investigación se utilizarán trabajos hasta con una data de 10 años de antigüedad.

Adicionalmente la Universidad Católica Andrés Bello (UCAB) no dispone como tal de un laboratorio de asfalto para la realización de los ensayos, por tal motivo en este trabajo se tuvo que solicitar el apoyo a laboratorios privados cuyos costos y tiempo limitaron la ejecución de los diferentes ensayos.

1.4.2 Alcances

Se trabajó con dos (2) tipos de agregados provenientes de: (1) Cantera “Las Marías”, ubicada en el Edo. Miranda, (2) “Las Minas de Cascabel”, ubicada en el Edo. Carabobo, utilizando dos diseños de MAC tipo M-12 que cumpliera con los parámetros del método MARSHALL y las especificaciones SUPERPAVE®.

Se realizaron los ensayos de pesos específicos para agregado grueso, fino y pasante 200 con cuyos resultados y utilizando el Método RAMCODES® se determinó el contenido óptimo de asfalto. Se ejecutó el Ensayo RICE de acuerdo a la norma ASTM D2041/D2041M-11, con la modificación del curado previo de la mezcla, sometiendo la muestra a diferentes tiempos de curado (2, 3 y 4 horas), para determinar si existe una variación significativa en los valores de la Densidad Máxima Teórica y el efecto que pueda tener en el Porcentaje Óptimo de Asfalto. Adicionalmente se determinó si existen diferencias en las propiedades MARSHALL.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Acevedo y Gorrín (2006) en su trabajo especial de grado titulado “Comparación de la Densidad Máxima Teórica (RICE), ASTM D2041, a diferentes tiempos de curado, utilizando diseños de Mezclas Asfálticas en Caliente, Tipo TN-12(S), de acuerdo al Método MARSHALL y Especificaciones SUPERPAVE”, presentado ante la Universidad de Carabobo; especifican la necesidad de obtener valores más exactos del ensayo RICE al sospechar que dicho ensayo normalizado, no considera de forma adecuada el porcentaje de asfalto absorbido por los agregados, en el tiempo transcurrido desde que se carga la mezcla en la tolva del camión hasta que es colocada en obra. En dicho trabajo se realizaron dos diseños de mezclas asfálticas en caliente tipo TN-12(S), con agregado de río (Morocopo) y de cantera (Isaseca), a los cuales le aplicaron el Método MARSHALL y las especificaciones SUPERPAVE para obtener el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, y el Ensayo RICE en mezclas no curadas y curadas (con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico). Una vez obtenido el tiempo máximo, realizaron el curado de mezclas para elaborar las briquetas. Al comparar los resultados obtenidos, observaron la incidencia de los Vacíos de Campo, con la Densidad de laboratorio y RICE curado y no curado.

Este trabajo especial de grado sirvió como referencia, en cuanto a la metodología y normas empleadas. Aportó conocimientos importantes al demostrar que el tiempo que transcurre desde la producción de la mezcla en planta, hasta su colocación en obra influye en los valores del RICE y en las propiedades MARSHALL.

Díaz y Valenzuela (2007) en su trabajo especial de grado titulado “Comparación de resultados obtenidos del ensayo de Densidad Máxima Teórica (RICE) según la norma

ASTM D2041, con los valores conseguidos al incluir diferentes tiempos de curado a las mezclas asfálticas en caliente y su efecto sobre el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, para dos diseños de mezcla tipo TN 9.5(s) con agregados diferentes, de acuerdo al Método MARSHALL y a las especificaciones SUPERPAVE”, presentado ante la Universidad Nacional Experimental Politécnica De La Fuerza Armada Nacional, presumen que el ensayo RICE no toma en cuenta la incidencia en la absorción del cemento asfáltico por los agregados. Se sustentan en el hecho de que cuando se realiza el ensayo según ASTM D2041, la mezcla es sometida a un rápido enfriamiento, que sólo logra cubrir superficialmente los agregados quedando vacíos sin llenar, acotando que en obra no ocurre este enfriamiento brusco. Indican que al realizar el ensayo RICE en el laboratorio, se le debería dar un margen de tiempo a la mezcla (tiempo de curado) manteniéndola a una temperatura constante desde la preparación de la mezcla, hasta que se extiende para enfriarla, simulando así lo que ocurre en campo, y obteniendo valores RICE más asociados a la mezcla que se va a utilizar. Utilizaron dos tipos de agregados: cantera (Las Marías) y río (La Poliédrica); determinaron el porcentaje óptimo de asfalto mediante el ensayo MARSHALL. Luego, realizaron el Ensayo RICE de la mezcla curada y no curada al 6.5% de cemento asfáltico. Compararon los valores RICE curado y no curado, de ambos diseños de mezclas; y sólo se compararon las curvas MARSHALL curada y no curada del agregado de cantera. Este trabajo se utilizó como referencia para observar las tendencias de cada curva MARSHALL, para determinar las diferencias entre las normas utilizadas con respecto a esta investigación.

Vale acotar que los diferentes trabajos especiales de grado que sirvieron como referencia para el desarrollo de esta investigación fueron publicados en fechas anteriores a la modificación de la norma ASTM D6926-10 que incluye como mínimo una (1) hora y máximo dos (2) horas de tiempo de curado de la MAC.

2.2 Bases Teóricas

El Asfalto

El asfalto es un material cementante de color negro, de consistencia sólida, semisólida o líquida y compuesta principalmente de bitúmenes obtenidos como residuo en la refinación del petróleo o en forma natural. Alcanzan altos grados de fluidez a las temperaturas de aplicación en el rango de los 135°C a los 170°C.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, se adhiere con facilidad a las partículas de agregados, por lo que se utiliza para unirlos en una MAC ya que le da flexibilidad, impermeabilidad, resistencia a la acción de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales, si es construido adecuadamente. Con el tiempo, tiende a ponerse duro y frágil, perdiendo su capacidad de adherirse a las partículas de agregado. Estos cambios pueden ser minimizados si se comprenden las propiedades del asfalto y si se toman medidas durante la construcción, para garantizar que el pavimento terminado sea construido de manera tal que pueda retardar el proceso de endurecimiento.

Refinación Del Petróleo

Existen tres procesos industriales para separar los diferentes componentes del petróleo crudo. El método de refinación más común en todo el mundo es la refinación por destilación. Este es un proceso en el cual las diferentes fracciones son separadas fuera del crudo sometiéndola a ciertas condiciones de temperatura.

Las fracciones livianas se separan por destilación simple, en cambio, los más pesados pueden ser separados solamente mediante una combinación de calor y vacío. El asfalto puede ser producido usando destilación por vacío a una temperatura aproximada de 480°C. Esta temperatura puede variar dependiendo del crudo que se esté refinando, o del grado de asfalto que se esté produciendo. (Ver Figura 1)

Tipos De Asfalto

Existe gran variedad de productos que derivan de la refinación del petróleo; entre ellos están los cementos asfálticos y asfaltos líquidos; pero también pueden ser comercializados como “asfaltos emulsionados”, o simplemente emulsiones, que se obtienen al mezclar un cemento asfáltico con agente emulsificante y agua. En Venezuela estos son procesados por industrias privadas.

Cementos asfálticos (CA): Asfalto que se obtiene directamente de la refinación del crudo. De acuerdo a la Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN) 1670:2007, “es el material aglomerante sólido o semisólido de color negro o pardo oscuro, que se ablanda gradualmente al calentarse y cuyos constituyentes predominantes son hidrocarburos pesados”.

En Venezuela es producida por la principal industria petrolera Petróleos de Venezuela S.A (PDVSA) y se clasifica según su viscosidad en los grados CA-5, CA-10, CA-20, CA-30 Y CA-40, siguiendo las normas COVENIN 1670:2007. Solo se comercializan los tipos CA-20 y CA-30, y en ciertas ocasiones, por pedidos especiales también un asfalto Tipo CA-40, con las propiedades físicas que se indican en la Tabla 1.

El cemento asfáltico venezolano es reconocido por su calidad y excelencia en la pavimentación en virtud de sus propiedades y características. Es un material altamente cementante, termoplástico, impermeable y es resistente al ataque de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales, posee además alta elasticidad a altas temperaturas, suficiente ductilidad a bajas temperaturas, baja susceptibilidad al cambio de temperatura, buena adhesión y cohesión y bajo contenido de parafina (alta resistencia al envejecimiento).

Para un adecuado manejo de los CA en planta (bombeo y mezclado), y en obra (extendido y compactación) deben ser calentados a temperaturas relativamente altas

(alrededor de los 150°C) que le proporciona fluidez al CA, permitiendo trabajabilidad. Las mezclas asfálticas que se obtienen a partir de los CA se denominan “Mezclas asfálticas en caliente” (MAC), según el Instituto Americano de Asfalto (IDA) 1992 o “Mezclas de Concreto Asfáltico en Caliente” (MCAC), según Norma INVEAS, aprobada parcialmente por FONDONORMA.

Asfaltos diluidos o cortado (cuttback asphalt): Resulta de la mezcla de cemento asfáltico con solventes de petróleos, también llamados diluyentes, en lo que se refiere a asfalto de curado rápido (RC) y curado medio (MC). Los diluyentes se evaporan una vez que se exponen a las condiciones atmosféricas.

Asfaltos Emulsificados o Emulsión Asfáltica: Es una mezcla de cemento asfáltico, agua y una pequeña cantidad de agente emulsificante que permite que la mezcla sea estable. Las partículas de asfalto se unen por coalescencia y coagulación en una película continua, que cementa las partículas del agregado cuando el agua se evapora. Dependiendo del agente emulsionante, la emulsión puede ser aniónico (glóbulos cargados negativamente) o catiónico (glóbulos cargados positivamente).



Figura 1: Temperaturas aproximadas de separación del crudo.

Fuente: http://3.bp.blogspot.com/F0aN_Pbi4rQ/T_jpZ744N1I/AAAAAAAAAFk/XYaNXuii98Q/s1600/Destilacion+Petroleo.jpg

Tabla 1: Especificación COVENIN 1670:2007 para cementos asfálticos de pavimentación

Propiedades	Grado de viscosidad										Método de ensayo
	CA5		CA10		CA20		CA30		CA40		
Viscosidad absoluta a 60 °C (140 °F) Pa.s (P)	50 ± 10 (500 ± 100)		100 ± 20 (1000 ± 200)		200 ± 40 (2 000 ± 400)		300 ± 60 (3 000 ± 600)		400 ± 80 (4 000 ± 800)		Norma Venezolana 2053
Viscosidad cinemática a 135 °C (275 °F) mm ² /s (cSt); min ⁽²⁾	175		250		300		350		400		Norma Venezolana 424
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s, min	140		80		60		50		40		Norma Venezolana 1105
Punto de inflamación, copa abierta Cleveland, min, °C (°F)	177 (350)		219 (425)		232 (450)		232 (450)		232 (450)		Norma Venezolana 372
Solubilidad en tricloroetileno, min, %	99,0		99,0		99,0		99,0		99,0		Norma Venezolana 1161
Punto de reblandecimiento anillo y bola (TA & B), °C	Min	Max.	Min	Max.	Min	Max.	Min	Max.	Min	Max.	Norma Venezolana 419
	!	!	44	54	48	58	48	58	50	70	
Gravedad específica a 25 °C	Reportar		Reportar		Reportar		Reportar		Reportar		Norma Venezolana 1386
Índice de penetración (IP)	-1,5	+0,5	-1,5	+0,5	-1,5	+0,5	-1,5	+0,5	-1,5	+0,5	Normas Venezolanas 419 y 1105
Viscosidad absoluta a 60 °C (140 °F) después de TFOT, Pa.s (P), máx.	250 (2500)		500 (5000)		1000 (10 000)		1500 (15 000)		2000 (20 000)		Norma Venezolana 2046
Ductilidad a 25 °C (77 °F), 5 cm/min, min, cm, después de TFOT	100		75		50		40		25		Norma Venezolana 1123
NOTAS: ⁽¹⁾ $IP = \frac{[20 * (TA \& B - 25) - 500 * (LogPen25^{\circ}C)]}{[TA \& B - 25 + 50 * (Log800 - LogPen25^{\circ}C)]}$ ⁽²⁾ 1cSt = 1 mm ² /s = 0,001 Pa.s											

Fuente: Norma COVENIN, 2007, Caracas.

Propiedades Químicas del Asfalto

El asfalto está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono) y algunas trazas de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. El asfalto, cuando es disuelto en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes asfaltenos y maltenos.

Los asfaltenos son compuestos de alto peso molecular, usualmente de color negro o pardo oscuro. Se encuentran en sus cadenas, en cantidad apreciable, elementos como oxígeno, azufre y nitrógeno. Los asfaltenos le dan las características de color y dureza al asfalto

Los maltenos son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. Las resinas son, por lo general, líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, mientras que los aceites son de color más claro. Las resinas proporcionan las cualidades adhesivas en el asfalto, mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfaltenos y las resinas. La proporción de asfaltenos y maltenos en el asfalto puede variar debido a un sin número de factores, incluyendo altas temperaturas, exposición a la luz y al oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla del pavimento, y espesor de la película de asfalto en las partículas de agregado. Las reacciones y cambios que pueden ocurrir incluyen: evaporación de los compuestos más volátiles, oxidación (combinación de moléculas de hidrocarburo con moléculas de oxígeno), polimerización (combinación de dos o más moléculas para formar una sola molécula más pesada), y otros cambios químicos que pueden afectar considerablemente las propiedades del asfalto. Las resinas se convierten gradualmente en asfaltenos, durante estas reacciones, y los aceites se convierten en resinas, ocasionando así un aumento en la viscosidad del asfalto.

Propiedades Físicas del Asfalto

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son:

- **Durabilidad:** Se define como la capacidad de un ligante asfáltico para mantener sus propiedades originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Estos procesos son los de almacenamiento, mezclado en planta, transporte, extendido y compactación en el pavimento y luego durante la etapa de servicio del pavimento. Es una propiedad que es evaluada a través del comportamiento del pavimento y depende de las características del agregado, diseño de la mezcla, procesos de producción y compactación, condiciones climatológicas del sitio y otras variables que incluyen la misma durabilidad del asfalto. Debido a que hay tantas variables que influyen en la durabilidad del asfalto es difícil obtener un resultado certero. Sin embargo, existen distintos ensayos para evaluar el endurecimiento del asfalto. Estos son: ensayo en estufa de película delgada rodante (TFROT), cámara de envejecimiento a presión (PAV), ensayo en estufa de Película delgada (TFOT) y el ensayo de Película delgada en horno rotatorio (RTFO).

- **Adhesión y cohesión:** Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

El ensayo es del tipo “califica-no califica”, y solo puede indicar si la muestra es, o no, lo suficiente dúctil para cumplir con los requisitos mínimos.

- **Susceptibilidad a la temperatura:** Es la característica fundamental y una de las propiedades más valiosas del asfalto que permite definirlos como “termoplásticos”, es decir que su consistencia cambia con la temperatura: mientras más caliente esté un asfalto menor será su viscosidad, es decir será más fluido. Para conocer la susceptibilidad a la temperatura de un ligante es necesario determinar en el laboratorio su grado de fluidez, o consistencia, a

dos temperaturas diferentes. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos provenientes de crudos diferentes, aun cuando tengan un mismo grado de consistencia a una misma temperatura. Así, por ejemplo, los asfaltos A y B de la Figura 2 tienen la misma penetración a 25°C, pero a cualquier otra temperatura su consistencia (medida como “penetración”) es diferente. Ésto se debe a que los asfaltos A y B tienen diferentes susceptibilidades a la temperatura. Mientras mayor sea la pendiente de la recta “viscosidad-temperatura” de un asfalto mayor será su susceptibilidad a la temperatura. El “asfalto A” es más susceptible a la temperatura que el “asfalto B”.

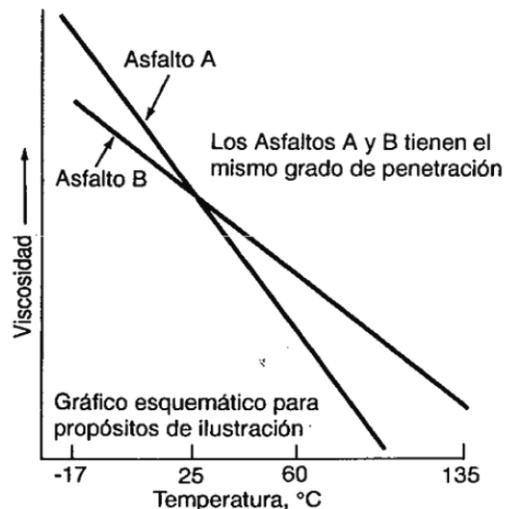


Figura 2: Variación de viscosidad con temperatura de dos asfaltos graduados por penetración.

Fuente: «Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente» por el Instituto de asfalto, 1992, Manual MS-22, edición en español, (p. 19)

Lo mismo puede suceder con dos asfaltos que tengan la misma viscosidad a una cierta temperatura, pero que provienen de crudos distintos. En la Figura 3 los asfaltos C y D tienen la misma viscosidad absoluta a 60°C, pero a cualquier otra temperatura su consistencia (medida como “viscosidad”) es diferente. Igual que encaso anterior, los

asfaltos C y D tienen diferentes susceptibilidades a la temperatura. El “asfalto C” es más susceptible a la temperatura que el “asfalto D”. (Ver Figura 3)

La conclusión es que, independientemente del método empleado para la medición de la consistencia (penetración o viscosidad), los asfaltos que provienen de crudos diferentes tendrán distintas susceptibilidades a la temperatura.

Es de suma importancia conocer la variación de la consistencia con los cambios en la temperatura de los asfaltos, ya que de ella se determina la temperatura a la cual se debe calentar el asfalto para ser mezclado con los agregados en la planta, y también la temperatura a la cual la mezcla debe ser compactada en el sitio de colocación.

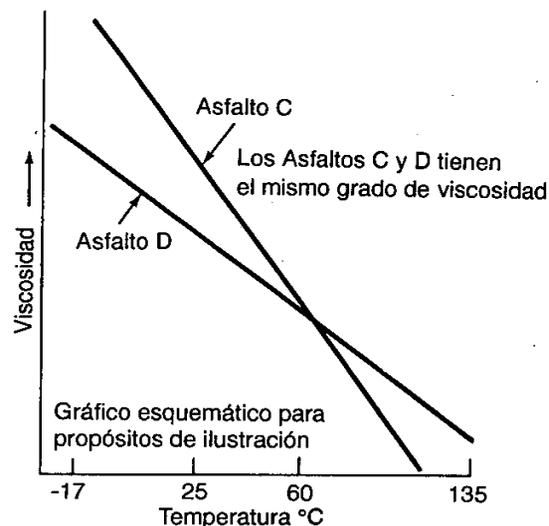


Figura 3: Variación de viscosidad con temperatura de dos asfaltos graduados por viscosidad.

Fuente: «Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente» por el Instituto de asfalto, 1992, Manual MS-22, edición en español, (p. 19)

- Endurecimiento y envejecimiento: El endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno presente en el aire y en el

agua), que ocurre fácilmente a altas temperaturas y en películas delgadas de asfalto. La oxidación y el endurecimiento del asfalto es más severo en la etapa de mezclado debido a que es cuando el asfalto se encuentra a altas temperaturas, y en películas delgadas que facilita el revestimiento del agregado. La figura 4 muestra el aumento de la viscosidad entre un material asfáltico “original” y el mismo material después de haber sido sometido al ensayo RTFO, el cual simula el efecto de envejecimiento a corto plazo durante las operaciones de almacenamiento y mezclado en planta. La viscosidad del asfalto envejecido es siempre mayor que la del asfalto original, y la especificación regula la relación entre ambas viscosidades, es decir la magnitud del envejecimiento a corto plazo.

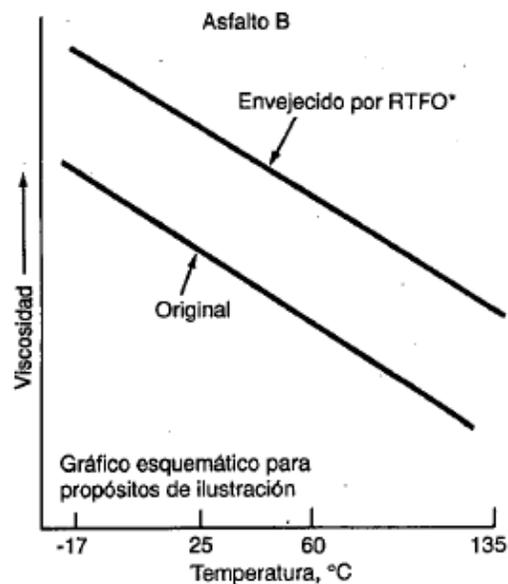


Figura 4: Viscosidad de un asfalto original y envejecido.

Fuente: «Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente» por el Instituto de asfalto, 1992, Manual MS-22, edición en español, (p. 20)

Para determinar las características de envejecimiento del asfalto es necesario ensayarlo por separado, esto se debe a que no todos los asfaltos endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas.

El proceso de envejecimiento no es solo función del tiempo sino que, de una manera muy marcada, este proceso se acelera cuando una mezcla en campo tiene un contenido de aire muy alto debido a la poca cantidad de CA.

Los Agregados

El agregado es cualquier material mineral, en forma de partículas, granos o fragmentos que, adecuadamente gradada en diferentes tamaños, conforman una mezcla asfáltica. Los agregados convencionales son las arenas (cernidas o lavadas), las gravas de río que son naturales por tener sus granos redondeados al ser producto del tamizado del material del banco, o angulares por ser trituradas; y los provenientes de canteras, como las calizas y los granitos, cuyos granos son siempre producto de la trituración y cernido del material obtenido de la voladura de los bancos; y las escorias de acería. Los agregados conforman aproximadamente entre el 90 y 95% del total en peso de la mezcla y entre el 75 y el 85% en volumen de la mayoría de las estructuras de pavimento

El comportamiento de un pavimento está íntimamente relacionado con la calidad y selección adecuada de los agregados, es por esta razón que es de suma importancia conocer las características físicas y mecánicas del agregado debido a que la resistencia total de la mezcla depende fundamentalmente del aporte de los agregados.

Clasificación de los agregados

- Rocas sedimentarias: Se forman por la acumulación de sedimentos (partículas finas) en el agua, o a medida que el agua se deposita. Los sedimentos pueden ser de origen mineral (gravas, areniscas y arcillas); de residuos de productos orgánicos (caliza, carbón);

ser el producto de una reacción química o evaporación (sal, yeso); o de la combinación de cualquiera de estos diferentes tipos de materiales. Las rocas sedimentarias se forman normalmente en capas o estratos dentro de la corteza terrestre, como consecuencia del proceso de sedimentación de los materiales en el fondo de lagos o mares antiguos. Las rocas sedimentarias más comunes son las areniscas y las gravas de río, que contienen un alto contenido de sílice, y son, por esta razón, llamados “agregados silicios”. Otras rocas sedimentarias muy frecuentes que contienen un alto porcentaje de carbonato de calcio, son denominadas “calcáreas” siendo la más común las calizas.

- Rocas Ígneas: Son rocas que provienen del material fundido (magma) formado en los volcanes, que se ha enfriado y solidificado. Estas rocas pueden ser “extrusivas” o “intrusivas”.

Las rocas ígneas “extrusivas” están formadas por el magma expulsado fuera de un volcán sobre la superficie terrestre y tienen una apariencia y estructura vidriosa debido a que el material se enfría rápidamente al ser expuesto a la atmósfera; la riolita, el basalto y la andesita son ejemplos de rocas extrusivas. El otro tipo de roca ígnea es llamado “intrusiva” ya que se forma del enfriamiento lento del magma que ha quedado atrapado en las profundidades de la corteza terrestre y que posteriormente, debido a movimientos de la corteza terrestre y a procesos de erosión son llevadas a la superficie; su apariencia y estructura es cristalina (*de grano grueso*). El granito y el gabro son ejemplos de rocas intrusivas.

- Rocas metamórficas: Son rocas sedimentarias o ígneas que han sido transformadas por procesos de intenso calor y presión, o por reacciones químicas. Muchos tipos de rocas metamórficas tienen como característica que sus minerales están alineados en capas o planos paralelos, y son denominadas como “de estructura foliada”; las más comunes son los gneiss, las pizarras y los esquistos. Las rocas metamórficas de estructura no paralela son “no foliadas”, como la cuarcita, el mármol y la serpentina.

Tipos de agregados para las mezclas asfálticas

Los agregados para mezclas asfálticas se clasifican de acuerdo a su origen: naturales, procesados o sintéticos.

- **Agregados naturales:** Son aquellos que se utilizan con muy poco o ningún procesamiento. Estos agregados se obtienen mediante procesos naturales de erosión y degradación por la acción del viento, agua, movimiento del hielo y los químicos. Los agregados naturales más comunes en el pavimento son las arenas y gravas de río; que son granos de texturas lisas y redondeadas por la acción de roce entre los propios granos a medida que han sido transportados desde el sitio de deslave hasta el sitio de sedimentación. El único proceso a que es sometido este tipo de agregado en obra es el cernido, que se realiza para eliminar aquellos agregados de tamaño mayor a 1,5 pulgadas. Su ventaja radica en su bajo costo, pero pueden presentar un alto grado de variabilidad granulométrica. La resistencia mecánica de las mezclas elaboradas con agregados 100% naturales, puede ser baja.

- **Agregados procesados:** Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y cernidos con el fin de modificar su forma, tamaño, distribución granulométrica y textura superficial. Como resultado de la trituración y cernido se obtienen agregados con diferentes tamaños, que deben ser combinados para lograr una distribución de tamaños que satisfaga una especificación determinada. A pesar de ser más costosas que los agregados naturales resultan mezclas asfálticas con propiedades mecánicas y volumétricas superiores. Las fuentes más comunes de agregados procesados son las gravas de río y los materiales de cantera.

- **Agregados sintéticos o artificiales:** Son agregados producto del procesamiento físico o químico de otros materiales. Algunos son el subproducto de procesos industriales como el refinamiento de metales. Otros son producidos mediante el procesamiento de materias primas.

El producto secundario más usado es la escoria de acería o agregado siderúrgico que es una sustancia no metálica que se obtiene durante el proceso de reducción del acero. La escoria es vertida en grandes copas y transportada a un patio, en donde es descargado y enfriado violentamente con chorros de agua, en un proceso conocido como “trituration por agua”. El material al enfriarse produce granos de diferentes tamaños que requieren solamente su tamizado antes de ser llevados a una planta de asfalto. El otro agregado sintético se obtiene al quemar arcilla o arcilla esquistosa. Son típicamente livianos y tienen una alta resistencia al desgaste superficial.

Propiedades y características físicas del agregado

Además de ser importante la calidad de los agregados, también se aplican otros criterios que forman parte de la selección apropiada de los mismos en un pavimento. Según el Instituto Americano de asfalto (IDA), estas propiedades son:

- **Gradación y Tamaño máximo de la partícula:** La “gradación” o simplemente “granulometría” es la característica más significativa y básica de los agregados ya que afecta la estabilidad y trabajabilidad de las mezclas. Se define como la distribución de tamaños del agregado determinado según la norma ASTM C136 y empleado para preparar la mezcla asfáltica. Algunos de sus componentes principales son: tamaño máximo (TM) y tamaño nominal máximo (TNM); el tamiz #8, la fracción de “tamaño arena” y el tamiz #200.

Tabla 2: Tamaños típicos de tamices

DESIGNACIÓN DE TAMICES PARA AGREGADOS GRUESOS		DESIGNACIÓN DE TAMICES PARA AGREGADOS FINOS	
Sistema Métrico	Sistema Habitual Norteamericano	Sistema Métrico	Sistema Habitual Norteamericano
63 mm	2 1/2 in.	2.36 mm	Nº 8
50 mm	2 in.	1.18 mm	Nº 16
37.5 mm	1 1/2 in.	0.60 mm	Nº 30
25.0 mm	1 in.	0.30 mm	Nº 50
19.0 mm	3/4 in.	0.15 mm	Nº 100
12.5 mm	1/2 in.	0.075 mm	Nº 200
9.5 mm	3/8 in.		
4.75 mm	Nº 4		

Fuente: *Principios de construcción de pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente Manual MS-22* (p. 47) por el Instituto Americano de Asfalto, Lexington

Existen dos métodos que se utilizan para determinar la gradación de agregados que son: tamizado en seco y tamizado por lavado. El tamizado en seco se usa con material agregado de gradación gruesa. Sin embargo, cuando las partículas de agregados están cubiertas de polvo o material limo-arcilloso, se debe efectuar un tamizado por lavado.

Tamaño máximo de la partícula: Es importante determinar el tamaño de las partículas más grandes en la muestra, debido a que las especificaciones de las mezclas asfálticas mencionan un tamaño máximo de partículas para cada agregado usado. Existen dos formas de designar tamaños máximos de partículas:

a) **Tamaño nominal máximo (TNM):** es el tamiz inmediatamente superior al primer tamiz que tiene más del 10% retenido; normalmente es igual al tamiz que sigue al del tamaño máximo. Es muy importante conocer la TNM ya que algunas propiedades volumétricas en una mezcla asfáltica están relacionadas con ella. La TNM influye en la resistencia al deslizamiento es por ello que algunas especificaciones internacionales recomiendan, para capas de rodamiento, un tamaño nominal máximo de 12,5 mm. (1/2") ya

que se ha demostrado que las mejores resistencias se logran con las superficies de textura arenosa

b) Tamaño máximo (TM): es el tamiz más pequeño por el que pasa el 100% de las partículas. En las mezclas asfálticas influye poco en la estabilidad de la mezcla, a diferencia de las mezclas de agregados sin cementantes (bases granulares), las cuales alcanzan su resistencia únicamente por la fricción interna entre las partículas de agregados. En las mezclas asfálticas, debido a la incorporación del asfalto se logra el proceso de cohesión, que es superior en las mezclas con mayor cantidad de agregados finos. El tamaño máximo afecta la trabajabilidad de la mezcla. Las mezclas con agregados gruesos de tamaño mayor a 25,4 mm (1 pulgada) son difíciles de trabajar y tienden a segregarse, originando vacíos superficiales que pueden originar disgregación.

Tamaño correspondiente al tamiz # 8: El tamiz # 8 separa los agregados, de acuerdo al IDA divide la “fracción gruesa” de la “fracción fina”: el retenido en el # 8 se denomina gruesos y el pasante finos.

El Filler o Material Llenante: Se define el “material llenante” o “tamaño arena” aquella porción del material comprendida entre el tamiz #16 y el tamiz #100. El material llenante juega un papel muy importante en el comportamiento de las mezclas asfálticas. A pesar de que representa una pequeña fracción en el peso de la mezcla, debido a su tamaño tiene una gran área superficial que afecta sensiblemente las características de las mezclas. Al ser mezclado con el CA forma el “*mastique asfáltico*” que influye en la estabilidad, cohesión, rigidez, contenido de vacíos y resistencia a la acción del agua y a las condiciones ambientales de las mezclas.

La fracción “pasa el tamiz #200” o polvo mineral: El tamaño #200 por su pequeño tamaño puede comportarse como un “extendedor de asfalto” que al ser mezclado con el ligante se comporta más como un líquido que como un sólido. Pequeñas variaciones en la

cantidad del Pasante #200 puede causar que la mezcla asfáltica resulte con exceso o muy pobre en asfalto, afectando así las características de diseño de la mezcla. Se utiliza para llenar vacíos en la mezcla, reduciendo así el contenido de asfalto requerido; sin embargo, debido a su gran área superficial, puede en algunos casos necesitarse la adición de mayor cantidad de asfalto.

Los materiales pueden clasificarse de acuerdo a sus características granulométricas: densamente gradados, de granulometría abierta, de granulometría discontinua, y de tamaño uniforme.

- Densamente Gradados: son aquellos que contienen agregados en cantidades adecuadas de todos los tamaños, de grueso a fino, proporcionados de tal forma que se obtiene una mezcla con pocos vacíos y por lo tanto poco permeables. Con este tipo de granulometría resultan mezclas con una alta resistencia friccional y con trituración reducida de las partículas.

- Granulometría Abierta: son aquellos materiales con una gradación “incompleta”, que contienen menos finos que los densamente gradados. Los esfuerzos entre partículas son superiores.

- Granulometrías Discontinuas (Skip-Graded): son agregados que presentan discontinuidades o saltos en su gradación.

- Granulometrías Uniformes: están constituidos en su mayoría por agregados de un tamaño único.

La norma INVEAS (aprobada parcialmente por FONDONORMA) indica la Tabla 3 los límites que deben estar comprendidas la granulometría de la mezcla asfáltica:

Tabla 3: Tipos y límites granulométricos de las mezclas asfálticas

		TIPO DE MEZCLA			
		M25	M19	M12	M9
Malla (tamiz)		Designación de la mezcla de acuerdo al Tamaño Nominal Máximo			
mm	Tamaño	25,4 mm	19,1 mm	12,5 mm	9,5 mm
37,5	1,5 pulg	100			
25,4	1 pulg	90/100	100		
19,1	3/4 pulg	< 90	90/100	100	
12,5	1/2 pulg	56/80	< 90	90/100	100
9,5	3/8 pulg		56/80	< 90	90/100
4,75	# 4	29/59	35/65	44/74	55/85
2,36	# 8	19/45	23/49	28/58	32/67
0,3	# 50	5/17	5/19	5/21	7/23
0,075	# 200	1/7	2/8	2/10	2/10

Fuente: Norma INVEAS (aprobado parcialmente por FONDONORMA).(p.2) por Instituto Venezolano del Asfalto, Caracas.

- Limpieza: Los agregados gruesos deben estar limpios, sin partículas de polvo o arcillas que los recubran, ya que esto afecta negativamente la efectiva adherencia del asfalto.

Los agregados finos no deben contener cantidades perjudiciales de arcillas, o de tamaños excesivamente pequeños. Eso se controla mediante el ensayo de equivalente de arena bajo la norma ASTM D2419. La norma INVEAS (aprobada parcialmente por FONDONORMA) establece los siguientes valores para este ensayo indicados en la Tabla 4:

Tabla 4: Valores mínimos para ensayo equivalente de arena

Características de la fracción fina y Método de Ensayo	TIPO DE TRÁNSITO		
	ALTO	MEDIO	BAJO
Equivalente de Arena ASTM D2419	> 45%	> 40%	> 35%

Fuente: Norma INVEAS (aprobado parcialmente por FONDONORMA). (p.3) por Instituto Venezolano del Asfalto, Caracas

- Dureza: Los agregados deben resistir el desgaste y degradación durante la producción, colocación, compactación y vida de servicio del pavimento. Los agregados que están cerca o en la superficie deben ser más resistente que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Ésto se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas de tránsito.

El ensayo de desgaste de Los Ángeles (ASTM C131) mide la resistencia de los agregados al desgaste y abrasión. La Norma INVEAS (aprobada por FONDONORMA) señala lo siguiente para los valores del ensayo mencionado:

Tabla 5: Valores permitidos del ensayo ASTM C131

DESGASTE LOS ANGELES (ASTM C131)			
Posición de la capa en la estructura del pavimento	TIPO DE TRÁNSITO		
	ALTO	MEDIO	BAJO
Rodamiento	> 40%	> 45%	>45%
Distinta a rodamiento	> 45%	> 50%	>50%

Fuente: Norma INVEAS (aprobado parcialmente por FONDONORMA). (p.2) por Instituto Venezolano del Asfalto, Caracas

- Forma de la partícula: la forma de la partícula afecta la resistencia del pavimento y la trabajabilidad de la mezcla asfáltica.

Angularidad de la fracción gruesa: Las partículas alargadas o planas son indeseables, aunque resisten la manipulación, tienden a romperse y a degradarse bajo los efectos de la compactación y del tráfico. Los agregados redondeados son más fáciles de compactar, porque existen mayores zonas de contacto entre los granos del agregado y una buena estabilidad, pero por su escasa rugosidad hay una menor fricción entre las superficies. Las mezclas de gravas no trituradas (bases asfálticas en caliente), requieren de un control muy cuidadoso en cuanto a su granulometría y contenido de ligante asfáltico, debido a que sus propiedades (estabilidad, flujo) son muy sensibles a las variaciones de estos parámetros.

La Norma INVEAS (aprobada parcialmente por FONDONORMA) ha sugerido para este ensayo los valores mínimos indicado en:

Tabla 6: Porcentaje en peso de las caras producidas por fractura, según Método COVENIN 1124

PORCENTAJE DE CARAS PRODUCIDAS POR FRACTURA (COVENIN 1124)			
Posición de la capa en la estructura del pavimento	TIPO DE TRÁNSITO		
	ALTO	MEDIO	BAJO
Rodamiento	> 80%	> 75%	> 60%
Distinta a rodamiento	> 70%	> 60%	>60%

Fuente: Norma INVEAS (aprobado parcialmente por FONDONORMA). (p. 2) por Instituto Venezolano del Asfalto. Caracas

Angularidad de la fracción fina: se define como el porcentaje de vacíos de aire presente en las partículas menores a los 2.36 mm (tamiz #8) cuando están levemente compactados; mientras mayor sea el contenido de aire mayor será la angularidad de los finos, esto se debe a que no se deslizan sobre otras con facilidad, dejando mayor espacio libre entre ellas. Esta propiedad asegura un alto grado de fricción interna del agregado fino y permite una mejor resistencia al ahuellamiento. Para medir la angularidad de los finos, se

realiza según norma la ASTM C1252. Los valores mínimos permitidos se presentan en la Tabla 6 y el porcentaje mínimo de arena natural en la Tabla 7, según el INVEAS.

Tabla 7: Criterios en cuanto a la Angularidad de los finos

PORCENTAJE DE CARAS PRODUCIDAS POR FRACTURA (COVENIN 1124)			
Características de la fracción fina y Método de Ensayo	TIPO DE TRÁNSITO		
	ALTO	MEDIO	BAJO
Angularidad (Método C) ASTM C- 1252 (93)	> 40%	> 35%	> 30%

Fuente: Norma INVEAS (aprobada parcialmente por FONDONORMA). (p. 3) por Instituto Venezolano del Asfalto, 2004, Caracas

Tabla 8: Porcentajes mínimos de Arena Natural

PORCENTAJE DE ARENA NATURAL			
Posición de la capa en la estructura del pavimento	TIPO DE TRÁNSITO		
	ALTO	MEDIO	BAJO
Rodamiento	> 20%	> 25%	> 35%
Distinta a rodamiento	> 25%	> 25%	> 35%

Fuente: Norma INVEAS (aprobada parcialmente por FONDONORMA). (p. 2) por Instituto Venezolano del Asfalto. 2004. Caracas.

- **Textura superficial:** Se considera como el principal contribuyente en la resistencia de las mezclas asfálticas a su deformación. Mientras más áspera es la superficie del agregado mejor se adhiere la película de asfalto al agregado y aumenta la resistencia en el pavimento ya que reduce el desplazamiento de una sobre otra y a su vez provee un alto coeficiente de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro. No existe un método directo par a evaluar la textura superficial.

- **Capacidad de absorción:** La capacidad de absorción o porosidad del agregado, en mezclas asfálticas, se define como la propiedad de absorción de asfalto que tienen los agregados. Es conveniente que estos agregados sean algo porosos, para que el asfalto pueda

ser absorbido y se adhiera a cada partícula. Si los agregados son muy porosos continuarían absorbiendo asfalto después de mezclado, como consecuencia, requieren mucha más cantidad de asfalto con respecto a los agregados menos porosos.

No existen en las normas venezolanas para mezclas asfálticas ningún requisito sobre la porosidad de los agregados, pero se considera ideal un agregado que presente una absorción de agua entre un 0,5% y un 1,0%, cuando se realicen sobre él los ensayos de absorción normalizados por la AASHTO T-84 y AASHTO T-85, tanto para los agregados gruesos como los finos.

Por otra parte el Método RICE, al cual se hará referencia en el capítulo, permite determinar las cantidades de asfalto absorbidas y efectivas, criterios muy importantes en la determinación del contenido óptimo de asfalto en una mezcla.

- **Afinidad por el asfalto:** Es la propiedad de un agregado para mantener sobre él la película de asfalto añadida. También se le puede llamar adherencia; la misma no sólo depende de la textura y composición química del agregado, sino también del CA. Para que una mezcla sea durable, debe existir una buena adherencia entre el agregado y el asfalto, para evitar la separación de la película de asfalto en presencia de agua.

Los agregados hidrofóbicos son aquellos agregados de naturaleza básica (calizas) que repelan el agua, favoreciendo así la adherencia con el asfalto. Los agregados hidrofílicos presentan afinidad con el agua, son de naturaleza ácida (gravas de río), y promueven la separación del grano con el asfalto. La adherencia puede mejorarse mediante el empleo de productos químicos, o con la adición de cal hidratada a la mezcla, en porcentajes entre 0,5% y 1,0% del peso total de la mezcla. Estas son soluciones técnicamente adecuadas pero normalmente muy costosas o imprácticas. Los ensayos de adherencia se realizan directamente sobre los agregados cubiertos por asfalto ensayo AASHTO T-182 o sobre las propiedades de las mezclas ya elaboradas.

- **Peso específico:** La Gravedad Específica (G_s) o Peso Específico (PE) se define como la relación entre el peso de un volumen de una cantidad determinada de agregados y el peso de un volumen igual de agua. Este valor se emplea en los cálculos volumétricos de una mezcla asfáltica.

De acuerdo a la manera como se toma en cuenta el volumen ocupado por las partículas de agregado, existen tres (3) tipos de pesos específicos que se emplean en las determinaciones de las propiedades de las mezclas asfálticas, tal como se indica en la Figura 5.

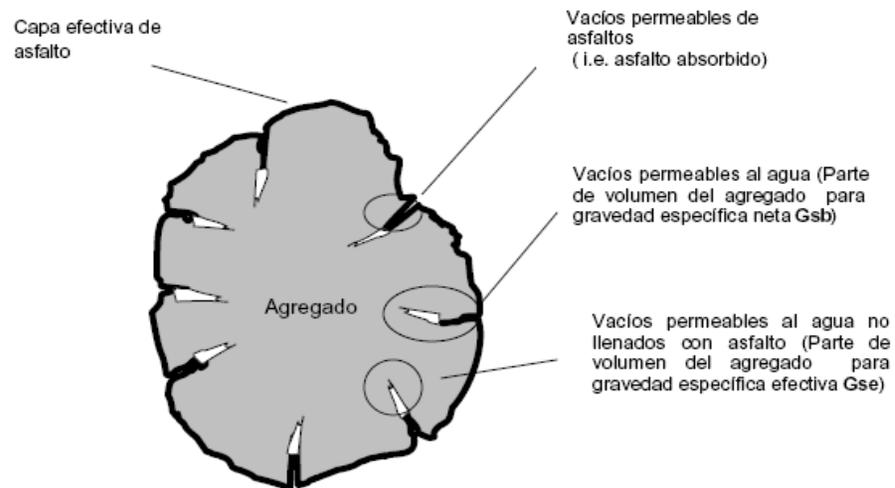


Figura 5: Tipos de pesos específicos.

Fuente: «Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas» por la Secretaría de comunicaciones y transportes Instituto Mexicano del transporte, 2004, (p. 18)

a) **Gravedad Específica Bulk (G_{sb}):** se considera el volumen del agregado incluyendo los poros permeables e impermeables del agregado. Por ser este el mayor volumen que puede ser considerado, es llamado “volumen bulk” y el valor de G_{sb} es el menor de las tres gravedades específicas que se emplean en el diseño de mezclas.

$$Gsb \text{ (agregado)} = \frac{\text{Peso (agregado)}}{\text{Volumen bulk (agregado)}} = \frac{W_{\text{retenido \#8}} + W_{\text{pasante\#8-retenido\#200}} + W_{\text{pasante\#200}}}{V_{\text{bulk retenido \#8}} + V_{\text{bulk pasante\#8-retenido\#200}} + V_{\text{bulk pasante\#200}}} \quad (1)$$

b) Gravedad Específica Aparente (Gsa): se considera el volumen del agregado incluyendo los poros impermeables, este volumen se denomina “volumen aparente” y resulta mayor a Gsb. Para hallar Gsa se emplean la misma ecuación que la Gravedad Específica Bulk.

c) Gravedad Específica Efectiva (Gse): se considera el volumen del agregado más el volumen de los poros permeables (volumen efectivo). Por lo tanto el valor de Gse es mayor que Gsb pero menor a Gsa.

$$Gse = \frac{P_{mm} - P_b}{\left(\frac{P_{mm}}{G_{mm}}\right) - \left(\frac{P_b}{G_b}\right)} \quad (2)$$

Donde: P_{mm} = es el peso total de la briqueta

P_b = es el peso o porcentaje del ligante de la mezcla total

P_s = es el peso (g), o porcentaje (%) del agregado en la mezcla total

G_b = es la densidad del asfalto a 25°C

La Mezcla Asfáltica

En una MAC, el cemento asfáltico y los agregados son combinados en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y el desempeño del pavimento.

Características y comportamiento de la mezcla

Una muestra de mezcla asfáltica preparada en el laboratorio, puede ser analizada para determinar su posible desempeño en el pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla y en la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Estas características, según el IDA son: la densidad, los vacíos de aire, o simplemente vacíos, los vacíos en el agregado mineral, y el contenido de asfalto.

- **La Densidad:** La densidad de la mezcla compactada es una característica muy importante, debido a que es primordial tener una alta densidad en el pavimento terminado. La densidad está definida como el peso de un volumen específico de la mezcla (peso unitario).

La densidad obtenida en el laboratorio es la densidad patrón que es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Usualmente las especificaciones requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio debido a que muy rara vez la compactación en sitio logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación en el laboratorio.

- **Vacíos de aire (o simplemente vacíos) (Vv):** Son espacios pequeños de aire que están entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesaria la presencia de ciertos porcentajes de vacíos en las mezclas para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre tres (3) y cinco (5) por ciento, dependiendo del diseño específico.

La durabilidad de un pavimento puede ser afectada por el contenido de vacíos, ya que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos permite la entrada del agua y del aire a la mezcla causando deterioro en el pavimento. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición donde el exceso de asfalto es exprimido hacia la superficie de la mezcla.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad, menor es el porcentaje de vacíos de la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra usualmente requieren, una densidad que contenga el menor número de vacíos; preferiblemente menos del ocho (8) porciento.

$$V_v = \left[\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right] \times 100 \quad (3) \quad G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (4)$$

Donde:

G_{mm} = densidad máxima teórica RICE

G_{mb} = densidad MARSHALL

P_{mm} = es el peso total de la briqueta

P_b = es el peso o porcentaje del ligante de la mezcla total

P_s = es el peso (g), o porcentaje (%) del agregado en la mezcla total

G_b = es la densidad del asfalto a 25°C

- Vacíos en el Agregado Mineral (VAM): son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado de una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios llenados por el asfalto. Representan el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla.

Cuanto mayor sea el VAM, más espacio disponible para las películas de asfalto que ayudaría a que se forme una película más gruesa de asfalto. Disminuir el contenido de asfalto es perjudicial para la mezcla asfáltica es por ello que se recomienda y especifica valores mínimos de VAM según la TNM de la mezcla.

$$VAM=100-\left[\frac{G_{mb}-P_s}{G_{sb}}\right] \quad (5)$$

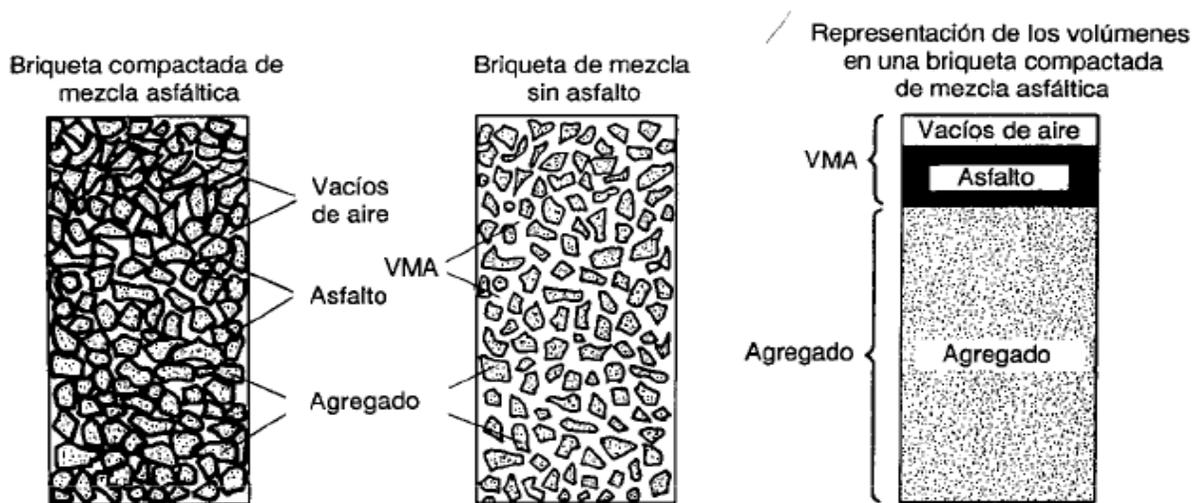


Figura 6: Ilustración de VMA en una probeta de mezcla compactada.

Fuente: «Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente» por el Instituto Americano de asfalto, 1992, (p. 59)

- **Contenido de asfalto:** Es la proporción de asfalto en la mezcla y se determina en el laboratorio según los criterios del método de diseño seleccionado. Adicionalmente es controlado en obra. 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.

Entre más cantidad de agregados finos contenga la gradación de la mezcla, mayor será el área superficial total, aumentando la cantidad de asfalto requerida para cubrir

uniformemente todas las partículas. Por otra parte las mezclas más gruesas exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto, es más pronunciada cuando hay relleno mineral. Cualquier variación en el contenido de relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca (mayor cantidad de asfalto) a húmeda (menor cantidad de asfalto). Se debe agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir su absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto.

Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto, cuando se refieren a asfalto absorbido y al no absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto respectivamente.

El contenido total de asfalto es la cantidad que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas de la mezcla. El contenido efectivo de asfalto (Pbe) es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado y se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

$$\text{Gramos de CA} = \frac{\text{Peso seco (gr)} \times \%CA}{100 - \%CA} \quad (6)$$

$$Pba = 100 \times Gb \times \left[\frac{Gse - Gsb}{Gsb \times Gse} \right] \quad (7)$$

$$Pbe = \left[Pb - \left(\frac{Pba}{100} \times Ps \right) \right] \quad (8)$$

Donde:

CA = cemento asfáltico

Gse = gravedad específica efectiva

Gsb = gravedad específica bulk

Pb = es el peso o porcentaje del ligante de la mezcla total

Ps = es el peso (g), o porcentaje (%) del agregado en la mezcla total

Pba = asfalto absorbido

Gb = es la densidad del asfalto a 25°C

Propiedades Consideradas en el Diseño de Mezcla

Para que un pavimento sea considerado de alta calidad; la mezcla asfáltica en caliente debe ser diseñada, producida y colocada de forma tal que se logre obtener las propiedades deseadas. El objetivo principal en el diseño de una mezcla, es garantizar que la misma posea las siguientes propiedades:

- **Estabilidad:** Es la capacidad de una mezcla asfáltica para resistir la deformación y el desplazamiento de las cargas producidas por los vehículos, y solo puede establecerse después de un análisis completo del tránsito esperado. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y planitud bajo cargas repetidas; un pavimento inestable sufre de ahuellamientos, ondulaciones y corrimientos.

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y cohesión interna de la mezcla, juntas previenen que los agregados se desplacen unos respecto a otros, debido a las cargas vehiculares. La fricción interna entre los agregados está íntimamente relacionada con la forma y textura superficial de la misma. Mucha cantidad de cemento asfáltico produce una película demasiado gruesa sobre los agregados, como consecuencia, disminuye la fricción entre las partículas.

La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto, y aumenta con la frecuencia del tráfico a medida que la viscosidad del asfalto incrementa, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en el pavimento (ver Tabla 9).

Tabla 9: Causas y efectos de una estabilidad baja

CAUSAS	EFFECTOS
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamiento, y afloramiento o exudación
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	baja resistencia durante la compactación y posteriormente durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización

Fuente: *Principios de construcción de pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente Manual MS-22*, (p. 61) por el Instituto Americano de Asfalto, 1992, Lexington.

$$\text{Estabilidad}_{\text{corregida}} = \text{Estabilidad}_{\text{leída}} \times \text{Factor}_{\text{prensa}} \times \text{Factor}_{\text{volumen}} \quad (9)$$

Ver Anexo C para Factores de corrección de la estabilidad leída en briquetas elaboradas siguiendo el Método MARSHALL de diseño de mezclas.

- **Durabilidad:** Es la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir la desintegración, los cambios en las propiedades del asfalto y la separación de la película de asfalto del o los agregados, por efecto de la acción del clima, el tránsito, o ambos.

La durabilidad normalmente, puede ser mejorada al aumentar el contenido de asfalto, con granulometrías densas en la combinación de agregados, y en mezclas bien compactadas e impermeables. Una de las razones para aumentar la cantidad de asfalto, es que la película que cubre los agregados, resulta ser más gruesa haciendo que el pavimento sea más resistente a endurecerse por envejecimiento. Además que reduce la cantidad de poros que pueda tener el agregado lo cual hace más difícil la entrada del agua o del aire al interior de la mezcla.

Una gradación densa de agregado firme, duro y resistente a la separación, aumenta la resistencia a la desintegración de la mezcla y contribuye a la impermeabilidad de la mezcla al igual que un buen diseño y compactación de la misma.

A continuación se presenta una lista de algunas causas y efectos asociados con la durabilidad del pavimento.

Tabla 10: Causas y efectos de una poca durabilidad

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfaltos	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración
Agregados susceptibles al agua (hidrofílicos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento dejando desgastado, o desintegrado

Fuente: *Principios de construcción de pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente Manual MS-22*, (p. 62) por el Instituto Americano de Asfalto, 1992, Lexington

- Impermeabilidad: es la resistencia de la mezcla al paso del aire y agua hacia el interior del pavimento, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada.

El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento. Todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad, son aceptables, siempre y cuando esté dentro de los límites especificados.

Tabla 11: Causas y efectos de la Permeabilidad

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causarán, tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla
Compactación inadecuada	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad

Fuente: *Principios de construcción de pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente Manual MS-22*, (p. 63) por el Instituto Americano de Asfalto, 1992, Lexington

- **Trabajabilidad:** Es la facilidad con que una MAC puede ser colocada y compactada. Puede ser mejorada modificando los parámetros del diseño de la mezcla, el tipo de agregado y/o la granulometría.

Las mezclas que son trabajables son muy inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Generalmente se debe a la falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano, partículas lisas y redondeadas de agregado, y/o demasiada humedad en la mezcla. Las mezclas gruesas, con un alto porcentaje de agregado grueso, tiende a segregarse y son difíciles de compactar. Un alto contenido de relleno mineral ocasiona que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación.

El asfalto tiene algún efecto sobre la trabajabilidad de la mezcla; debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

Tabla 12: Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad

CAUSAS	EFFECTOS
Tamaño máximo de partícula: grande	Superficie áspera, difícil de colocar
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable; superficie áspera, difícil de compactar
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar; poco durable

Fuente: *Principios de construcción de pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente Manual MS-22*, (p. 64) por el Instituto Americano de Asfalto, 1992, Lexington

- **Flexibilidad:** Es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo el pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos.

- **Resistencia a la Fatiga:** Se define como la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas vehiculares. Se ha demostrado que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta (por diseño o por falta de compactación) la resistencia a la fatiga disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se

flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre las subrasantes débiles. A continuación se presenta una lista de las causas y los efectos que conducen a una mala resistencia a la fatiga.

Tabla 13: Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacios altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Falta de compactación	agrietamiento por fatiga

Fuente: *Principios de construcción de pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente Manual MS-22*, (p. 64) por el Instituto Americano de Asfalto, 1992, Lexington

- Resistencia al deslizamiento: Es la capacidad que tiene la superficie de un pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento del neumático. Las características que se deben tomar en cuenta en una mezcla asfáltica en relación a la resistencia al deslizamiento son: agregados pétreos con textura áspera y no pulidos, vacíos de la mezcla asfáltica comprendidos entre ciertos límites para evitar la exudación y una macro textura gruesa final que facilite el drenaje superficial del agua

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura extra áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5mm (3/8 pulgada) a 12.5mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el pulimento (alisamiento) bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimento que los agregados silicios. Las mezclas inestables, que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie), presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

Tabla 14: Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento

CAUSAS	EFFECTOS
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal gradado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

Fuente: *Principios de construcción de pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente Manual MS-22*, (p. 65) por el Instituto Americano de Asfalto, 1992, Lexington

Métodos de Laboratorio para el diseño de la MAC

Existen muchos métodos de laboratorio que permiten diseñar mezclas asfálticas en caliente. Los más conocidos son: El Método Hubbard-Field, El Método Triaxial de Smith, El Método Hveem, El Método MARSHALL, El Método SUPERPAVE®, y El Método RAMCODES® (Rational Methodology for Compacted geomaterial’s Density and Strength analysis, que significa: “Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados”)

El Método Hveem es un método de aplicación limitada en algunos estados de los Estados Unidos Americanos, debido al costo de los equipos y a la complejidad del proceso.

El Método SUPERPAVE® (1999), es un método científico en donde se emplean equipos de costos elevados (cercano a los US \$ 120.000).

El Método MARSHALL es el más utilizado a nivel mundial, por lo simple de sus procedimientos y lo relativamente económico de sus equipos (cerca de los US \$ 15.000). Es el método de diseño y control de mezclas asfálticas en caliente utilizado en Venezuela en todos los países de Centro y Sur América.

El Método RAMCODES® es un procedimiento de cálculo rápido y corto que estima el contenido óptimo de asfalto en una mezcla; aplicable tanto para el Método

Marshall como para el Método SUPERPAVE®. Este procedimiento ha sido publicado en la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE).

El Método MARSHALL

El método MARSHALL fue desarrollado por el Ingeniero Bruce Marshall, experto en pavimentos asfálticos y miembro del Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi (EEUU) a finales de la década de los años 40. Luego, el método fue mejorado por el Cuerpo de Ingenieros de Carreteras e incorporó algunas modificaciones. Este método se utiliza tanto para el diseño en laboratorio como para el control de mezclas elaboradas en planta. Actualmente este procedimiento ha sido adoptado por la ASTM D1559: “Resistencia al Flujo de las Mezclas Asfálticas mediante el Empleo del Equipo MARSHALL”.

- Propósito del método. Determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación de agregados de granulometría densa o fina, con un TNM de 25mm. Proporciona información sobre las propiedades de la MAC (densidad, flujo, estabilidad, vacíos, entre otras).

- Resumen del Método. El procedimiento del Método MARSHALL comienza con la preparación de las briquetas de ensayo de 102 mm (4.0 pulg.) de diámetro y 64 mm (2.5 pulg.) de altura, las cuales son preparadas siguiendo un procedimiento normalizado de calentamiento, mezclado y compactación de la mezcla.

Previamente es necesario diseñar la combinación de los agregados que cumpla con las especificaciones de calidad y granulométricas establecidas, la cual se mantendrá constante para cada una de las briquetas que se prepararán en el ensayo. También se deben determinar los Pesos Específicos Bulk y Aparente de la combinación de agregados seleccionada. Con respecto a la cantidad de CA a utilizar, se debe conocer el Peso

Específico Aparente del cemento asfáltico (Gb), a 25°C (valor tomado directamente del “Certificado de Calidad” que expide PDVSA o calculado en base al valor de Gb que nos suministre dicho certificado)

El método MARSHALL de ensayo está dividido en dos etapas: la primera consiste en realizar el análisis de densidad y vacíos, mediante el cual se determina la composición volumétrica de la mezcla; y para la segunda etapa se determina la estabilidad y flujo de las briquetas compactadas, que permite determinar propiedades mecánicas de la mezcla.

- Estimación del contenido de asfalto promedio inicial. Se realiza una estimación inicial del contenido de asfalto promedio, y con este se prepararán mezclas con el promedio inicial de ligante y otras cuatro (4) mezclas, dos de ellas con contenido de ligante por encima del promedio inicial y otras dos con contenido de ligante por debajo del promedio estimado. Cada uno de los diferentes contenido de ligante se denomina “puntos de asfalto” lo cual quiere decir que la preparación y análisis de muestras se realiza para “cinco puntos de asfalto”. La diferencia entre un “punto de asfalto” y el siguiente es de un medio por ciento (0.5%) de la cantidad de asfalto considerada. Para cada punto de asfalto se preparan tres (3) briquetas, y se preparan otras tres (3) mezclas para el contenido de asfalto correspondiente al promedio inicial (18 briquetas en total).

- Proceso de laboratorio (ASTM D6926 y ASTM D6927).a) Pesaje de los agregados, y b) Calentamiento del asfalto y de los agregados. Cada pesada se prepara con 1200g de peso total más la cantidad de asfalto que sea requerida que se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Gramos de CA} = \frac{\text{Peso seco (gr)} \times \%CA}{100 - \%CA}$$

Luego se mezclan los agregados y el cemento asfáltico calculado a la temperatura de mezclado, determinada a partir del “Gráfico viscosidad-temperatura”

- Expresión del contenido de asfalto y adición del asfalto. Existen dos maneras de expresar la cantidad de asfalto que se incorpora a una mezcla: a) como porcentaje del peso total de agregados, o b) como porcentaje del peso total de mezcla. La segunda forma de expresión es la que se ha adoptado en Venezuela para el Método MARSHALL, por lo que cuando se dice que una mezcla tiene el 5% de asfalto significa que de cada 100 kg de mezcla, 5 kg serán de asfalto y los restantes 95 kg corresponden a la cantidad de agregados utilizados en la elaboración de la mezcla.

- Tiempo de Curado. Una vez que ha sido preparada la mezcla, se dispone en un recipiente metálico cubierto y se coloca en el horno a una temperatura de entre 8°C a 11°C por encima de la temperatura de compactación por un tiempo mínimo de una (1) hora y un máximo de dos (2) horas.

- Compactación de las briquetas. Una vez que se ha cumplido el tiempo de curado, se coloca la mezcla en el molde de las briquetas y se deja enfriar hasta la “temperatura de compactación”, la cual también se determina de acuerdo al “Gráfico Viscosidad-Temperatura”.

-Número de golpes por cara. Una vez que la mezcla ha enfriado hasta alcanzar la temperatura de compactación, se procede a compactarla mediante el empleo del “Martillo MARSHALL”, el cual tiene un peso de 10 lb y una altura de caída de 18 pulgadas. Las briquetas se moldean sobre un pedestal de madera de 20x20x45 cm., que debe tener un peso determinado entre 12.8 y 14.5 Kg.; sobre el pedestal se coloca una plancha de acero de 25 mm de espesor. El número de golpes que se aplican sobre cada cara de las briquetas dependen del tráfico esperado. La Norma INVEAS (aprobada parcialmente por FONDONORMA) recomienda lo siguiente: para un tráfico alto o medio, 75 golpes por cara

y para un tráfico bajo, 50 golpes por cara. Donde las especificaciones según el tipo de tránsito se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 15: Especificaciones según tipo de tránsito

TIPO DE TRÁNSITO			
Características del tránsito	ALTO	MEDIO	BAJO
Ejes equivalentes (EE) a 8,2 ton en el período de diseño	> 20 millones	2 a 20 millones	> 2 millones
Camiones/Día por sentido	> 800	100 – 800	< 100
PDT por sentido	> 3000	500 – 3000	> 500

Fuente: *Norma INVEAS (aprobado parcialmente por FONDONORMA)*. (p. 1) por Instituto Venezolano del Asfalto, 2004, Caracas

Una vez que las briquetas han sido compactadas, se dejan enfriar a temperatura ambiente hasta una temperatura cercana, o menor a los 60 °C, y se extraen del molde para proceder a su pesado.

-Pesado de las briquetas y análisis de la densidad de vacíos. Después que las briquetas se extraen del molde, se procede a pesarlas al aire (peso al aire), sumergidas en agua (peso en agua), y nuevamente al aire después de secarla superficialmente (peso al aire después de sumergirla con superficie seca). Con estos datos se determinan su volumen y su densidad (Gmb). Adicionalmente se calculan los valores de Vacíos Totales (Vv), los Vacíos Del Agregado Mineral (VAM), y los Vacíos Llenados con Asfalto (VII), los cuales se expresan como un porcentaje en función del volumen total de la mezcla compactada y posteriormente se grafican para seleccionar el contenido de asfalto óptimo.

$$VII = \left[\frac{V_{AM} - V_v}{V_{AM}} \right] \times 100 \quad (10)$$

-Determinación de la Gravedad específica máxima de la mezcla sin vacíos (Gmm). Para determinar el valor de Gmm se realiza el ensayo RICE. Se toma cierta cantidad de

mezcla asfáltica sin compactar, cantidad que varía según el TNM del agregado (ver tabla 16), y se pesa dentro del frasco de vacío (picnómetro). Se le añade agua (a una temperatura de $25 \pm 4^\circ \text{C}$) hasta sumergir la muestra y se realiza el proceso de vacío, que tiene un tiempo de duración de 5 a 15 minutos (la presión residual del manómetro debe ser $27,5 \pm 2,5 \text{ mm de Hg}$). Al finalizar la extracción de vacíos se agrega agua hasta el tope tomando cuidado de no producir burbujas de aire, se enrasa el frasco con una lámina de vidrio (calibrada previamente con el frasco RICE); se obtiene el peso del frasco con agua y la muestra sin vacíos y se mide la temperatura de la masa dentro del frasco. Todas las medidas obtenidas son referidas a 25°C aplicando un factor de corrección.

Tabla 16: Cantidad de muestra para Ensayo RICE, según TNM

Nominal Maximum Aggregate Size, mm (in)	Minimum Sample Size, g
37,5 (1½)	5000
19 to 25 (¾ to 1)	2500
12,5 (½) or smaller	1500

Fuente: Norma ASTM D2041/D2041M -11. (p. 2) por ASTM Internacional, 2011.

A través del Ensayo de RICE (ASTM D2041) se determina el valor de la Gravedad específica máxima de la mezcla no compactada (Gmm) a 25°C , fundamental para obtener el porcentaje de vacíos en mezclas compactadas (Vv, VAM y VII), así como para el cálculo de la cantidad de asfalto absorbido por los poros internos de los agregados.

-Determinación de la estabilidad y flujo. Se sumergen las briquetas durante un lapso de 30 a 40 min en un baño de agua a temperatura constante de $60 \pm 1^\circ \text{C}$ para representar la máxima temperatura a la que puede llegar un pavimento asfáltico en época de verano, y el hecho de sumergirla representa la ocurrencia de una lluvia intensa en un momento de alta

temperatura, que causa que el agua corra sobre la superficie del pavimento, con el fin de proceder posteriormente a la determinación de su valor de estabilidad y flujo.

Una vez que se sacan las briquetas del baño de agua estas se secan superficialmente; se someten a la Prensa MARSHALL y al fluxómetro (este procedimiento desde que son sacadas del baño de agua y sometidas a la Prensa MARSHALL no puede tardar más de 30 seg). En el momento inmediatamente anterior al que se produce la rotura de la biqueta, y en el anillo de carga, se lee la carga axial aplicada: esta carga máxima se registrará como la “Estabilidad” de la biqueta (lbs.f), y en ese mismo momento se registra la deformación diametral que ha sufrido la biqueta, denominada “flujo” o deformación MARSHALL, y convencionalmente se expresa su unidad como “centésimas de pulgada (0,01 pulg)”. La estabilidad medida en el ensayo debe ser corregida en función de la altura de la biqueta, o más sencillamente en función del volumen de cada biqueta, ya que para la comparación entre estabilidades, sea real, todas las briquetas deben ser de la misma altura.

Los valores exigidos de las propiedades MARSHALL para el diseño de mezclas en laboratorio en nuestro país son:

Tabla 17: Propiedades MARSHALL exigidas para el diseño de mezclas en laboratorio

Propiedades Marshall	TRÁNSITO		
	ALTO	MEDIO	BAJO
Nº de golpes por cara	75	75	50
% vacíos totales (1)	3-5	3-5	3-5
% vacíos llenados	65-75	65-75	65-78
Estabilidad Marshall (mínima) lbs	2200	1800	1600
Flujo (pulg/100)	8-14	8-14	8-16
Vacíos del agregado mineral (VAM)	valor según Tabla 2, en función del tamaño nominal máximo del agregado y el % de vacíos		
(1) calculados en base a la densidad máxima teórica determinada según el ensayo Rice (Método ASTM D-2041)			

Fuente: Norma INVEAS (aprobada parcialmente por FONDONORMA). (p. 4) por el Instituto Venezolano del Asfalto, Revisadas en Diciembre del 2004, Caracas.

Tabla 18: Valores de vacíos en el agregado mineral (VAM), en función de la TNM del agregado y del % de vacíos totales de la mezcla

Tamaño nominal	Contenido de vacíos totales en la mezcla (%)		
	3,0	4,0	5,0
25,4	11	12	13
19,1	12	13	14
12,5	13	14	15
9,5	14	15	16
Nota: interpolar en caso de que el porcentaje de vacíos totales se encuentre entre los valores enteros indicados			

Fuente: *Norma INVEAS (aprobada parcialmente por FONDONORMA)*. (p. 4) por Instituto Venezolano del Asfalto, Revisadas en Diciembre del 2004, Caracas.

El Método RAMCODES®

La metodología RAMCODES® es una metodología de cálculo para diseñar y controlar geomateriales compactados, tales como suelos y mezclas asfálticas, desarrollada desde el año 1998 por el Ing. Freddy Sánchez con la asistencia técnica y económica de la compañía Venezolana SOLESTUDIOS C.A. Se fundamenta en conocimientos de estadística para realizar y analizar experimentos relacionados con el diseño, y establecer un control de calidad donde se toman en cuenta los niveles de error asociados a la importancia de la obra.

Está compuesto por cinco (05) módulos de los cuáles uno, determina el contenido óptimo de asfalto a través del procedimiento del “polígono de vacíos”. Es conocida tanto en Venezuela como en otros países del mundo, y se encuentra disponible en el Portal: www.ramcodes.com.

El Polígono de Vacíos y el Diseño Marshall acelerado por RAMCODES®

A manera de evaluar la compactación y desempeño mecánico e hidráulico de la mezcla asfáltica se emplean dos variables que controlan el comportamiento de las mezclas y que se pueden medir en laboratorio y en campo las cuales son: el contenido de asfalto y la densidad. Otras variables como la velocidad y el tipo de carga (por ejemplo) permanecen constantes.

El contenido de asfalto y la Densidad, junto con otras variables como el Peso Específico de la combinación de agregados, nos permiten expresar matemáticamente los conceptos de vacíos: a) Vacíos en el agregado mineral o porosidad, b) Vacíos llenados con asfalto o grado de saturación y c) los vacíos de aire.

Para comprender adecuadamente el método de vacíos aplicado durante los ensayos, es necesario aclarar el término ARIZADA o aritmética generalizada, la cual es el conjunto de formulaciones que permiten trazar gráficamente los lugares geométricos de los conceptos de vacíos dentro del marco de Densidad y Contenido de asfalto (por sus siglas G_m y P_b). Por otro lado el área de exclusión que se genera cuando se representan todas las condiciones de vacíos que según el método de diseño MARSHALL garantice un comportamiento satisfactorio de la mezcla. Tomando en cuenta esta definición, el polígono de vacío es el área máxima donde se cumplen simultáneamente todas las condiciones de vacíos impuestas por las especificaciones dadas para el diseño de la mezcla asfáltica. En las figuras 6 y 7, se muestran los Polígonos de Vacío y el Polígono de Vacío con Centroide.

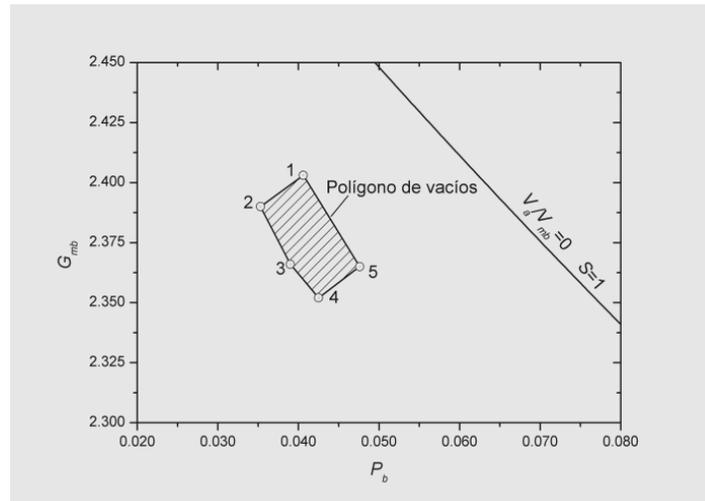


Figura 7: Polígono de Vacío.

Fuente: «Apuntes de Pavimentos Vol. 2» por G. Corredor, 2011, *Mezclas Asfálticas materiales y diseño*, (p. 5-43)

En la figura 7 se muestra el polígono de vacío después de las intersecciones de las curvas de saturación y las curvas correspondientes a los valores de vacío para el diseño de la mezcla asfáltica.

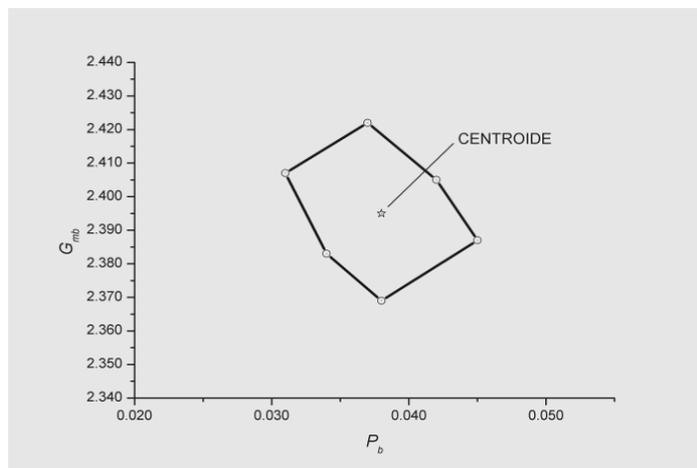


Figura 8: Polígono de vacío con Centroide.

Fuente: «Apuntes de Pavimentos Vol. 2» por G. Corredor, 2011, *Mezclas Asfálticas materiales y diseño*, (p. 5-43)

En la figura 8 se muestra el Centroides del polígono de vacío que representa el valor del Contenido óptimo de asfalto de una MAC.

Estas representaciones gráficas, tienen una aplicación importante tanto para el diseño y control de compactación de las mezclas, debido a que ahorran tiempo en el proceso de tanteo y además que permite el seguimiento de lo que se diseña en campo a fin de evitar desviaciones o problemas por el diseño.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

La metodología (meta = a través de, fin; oídos = camino, manera; logos = teoría, razón, conocimiento): Es la teoría acerca del método o del conjunto de métodos. La metodología es normativa (valora), pero también es descriptiva (expone) o comparativa (analiza). La metodología estudia también el proceder del investigador y las técnicas que emplea.

Grzegorzcyk, en su libro "Hacia una síntesis metodológica del conocimiento", dice: "lo esencial del conocimiento excede los límites de la metodología". Más adelante señala, en la misma página, "en algunas ciencias la curiosidad se satisface más por medio de la observación y la experimentación, en tanto que el deseo de comprender encuentra su satisfacción en la teoría" (Grzegorzcyk, 1967, p. 5).

Nuestra curiosidad hacia el estudio del comportamiento de la MAC y las posibles causas que pudieran estar afectando la calidad de la misma, es lo que ha motivado esta línea de investigación, donde se simuló en laboratorio el proceso de fabricación, traslado y colocación en obra de la MAC tomando en cuenta las condiciones en campo.

3.1 Tipo de Investigación

El método. Una definición del método la encontramos en Mendieta Alatorre (1973, p. 31). "Método es el camino o medio para llegar a un fin, el modo de hacer algo ordenadamente, el modo de obrar y de proceder para alcanzar un objetivo determinado".

Método y metodología son dos conceptos diferentes. El método es el procedimiento para lograr los objetivos. Metodología es el estudio del método.

Con respecto al tipo de investigación, Tamayo y Tamayo (2003), expresa lo siguiente: "Cuando se va a resolver un problema en forma científica, es muy conveniente tener un conocimiento detallado de los posibles tipos de investigación que se pueden seguir. Este conocimiento hace posible evitar equivocaciones en la elección del método adecuado para un procedimiento específico. Conviene anotar que los tipos de investigación difícilmente se presentan puros; generalmente se combinan entre sí y obedecen sistemáticamente a la aplicación de la investigación". (p. 37).

Cuando se realiza una investigación es de vital importancia la selección del tipo de investigación que se llevará a cabo, pues la misma guiará el camino, indicará los métodos, instrumentos que se aplicarán y contemplará el enfoque general de la investigación para poder alcanzar los objetivos planteados.

Para Tamayo y Tamayo (2003), la investigación experimental: "Se presenta mediante la manipulación de una variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular". (p. 41)

Se determina así que el tipo de investigación que se llevó a cabo es experimental estudiando causa-efecto, sometiendo la MAC a diferentes tiempos de curado y observando las posibles variaciones que el mismo podría generar en la Densidad Máxima Teórica y en las propiedades MARSHALL de la misma.

3.2 Diseño de la Investigación

Según Sabino (2000) su objeto es proporcionar un modelo de verificación que permita contrastar hechos con teorías, y su forma es la de una estrategia o plan general que determina las operaciones necesarias para hacerla. (p.91).

“El diseño de investigación es la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado. En atención al diseño, la investigación se clasifica en: documental, de campo y experimental.” (Arias, 2006, p.26).

En Venezuela es común colocar la MAC en su lugar de destino varias horas después de que la misma es cargada en la tolva del camión en planta, este trabajo de investigación está destinado a observar las condiciones de la mezcla en ese espacio de tiempo, por lo que el tipo de investigación más adecuado es la experimental.

3.3 Etapas de la Investigación

Establecido el diseño y tipo de investigación, se elabora una estrategia compuesta por una serie de pasos a seguir para el desarrollo de la misma, de modo que permita alcanzar los objetivos planteados manteniendo el esquema de una investigación experimental.

Etapa I: Presencia de un problema para el cual se ha realizado una revisión bibliográfica.

Etapa II: Identificación y definición del problema.

Etapa III: Desarrollo de todas las hipótesis y variables, desarrollo del objetivo general y objetivos específicos.

Etapa IV: Diseño del plan experimental. Esta etapa contempla la realización de los ensayos en el laboratorio y a su vez se subdivide en las siguientes fases:

Fase I: Selección y almacenamiento de las muestras de agregados y cemento asfáltico, con los cuales se procederá a realizar la mezcla asfáltica en caliente.

Fase II: Elaboración de los diseños de mezcla tipo M-12 bajo los parámetros del Método MARSHALL y de acuerdo a las especificaciones SUPERPAVE®.

Fase III: Determinación de los pesos específicos para los agregados gruesos y finos bajo los parámetros de ASTM C127 y ASTM C128 respectivamente.

Fase IV: Elaboración del Ensayo RICE para ambos diseños según lo establecido en la norma ASTM D2041/D2041M-11 (ver Anexo E), con la inclusión de los diversos tiempos de curado en las mezclas previo a la realización del ensayo.

Fase V: Elaboración de briquetas según norma ASTM D6926-10 para tiempo de curado de 0 y 4 horas. Determinación de las propiedades MARSHALL de la mezcla curada y no curada según norma ASTM D6927-05^{e1} (ver Anexo E).

Etapa V: Presentación de los resultados.

Etapa VI: Análisis y comparación de los resultados obtenidos de los ensayos en el laboratorio.

Etapa VII: Elaboración de las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

3.4 Población y Muestra

“La población, (...) es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación...” (Arias, 2006, p. 81).

Para esta investigación la MAC es considerada el universo que motiva el estudio, englobando todos los elementos, siendo analizada para conocer su comportamiento bajo ciertas condiciones con la finalidad de llegar a una respuesta que permita mejorar su calidad, trabajabilidad y durabilidad.

“La muestra es un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible.” (Arias, 2006, p. 83).

La muestra está representada por los diferentes tipos de agregados que componen la MAC. A través de las características de estos agregados se puede observar su variabilidad. Los agregados fueron seleccionados de forma intencional, ya que se han utilizado en obras viales de envergadura como La Autopista Regional del Centro (ARC) perteneciente al eje vial nacional TO01, Aeropuerto de Valencia, Autopista Francisco Fajardo, Aeropuerto internacional de Maiquetía pista 10-28, Aeropuerto Caracas, Autopista Petare -Guarenas –Caucagua, entre otras.

3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Cada área cuenta con técnicas particulares para acometer los objetivos que espera lograr; así en una investigación se precisa definir el término. Arias (2006) expresa “Se entenderá por técnicas, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información” (p. 67).

“...una técnica conduce a la obtención de información, la cual debe ser guardada...los datos pueden ser recuperados, procesados, analizados e interpretados posteriormente. A dicho soporte se le denomina instrumento.” (Arias, 2006, p.69).

Según lo expresado por Ramírez, (2007) “el instrumento de recolección de datos es un dispositivo de sustrato material que sirve para registrar los datos obtenidos a través de las diferentes fuentes”: (p.108).

La importancia de los instrumentos de recolección es fundamental, tal como lo señala Hernández, Fernández y Baptista, (1999). “El instrumento de medición o recolección de los datos juega un papel central. Sin él no hay observaciones clasificadas”. (p.234).

Para el desarrollo de este Trabajo Especial de grado se consultaron distintas fuentes bibliográficas, que sirvieron para tener un conocimiento general del tema a desarrollar y diera una base o indicio en el planteamiento de las diferentes hipótesis. Se consultaron libros, manuales, guías, trabajos de investigación, siendo estas las bases para el desarrollo del marco teórico y de los diferentes ensayos que se ejecutaron con la ayuda de un operador.

Para Tamayo y Tamayo, instrumentos son “los medios materiales que se emplean para recoger y almacenar la información. Ejemplo: fichas, formatos de cuestionario, guías de entrevista, grabadores, etc.” (p. 142).

Al realizar los ensayos en el laboratorio se utilizaron los siguientes materiales para recoger y almacenar la información:

- Cuaderno de notas, donde se hacían las anotaciones importantes observadas en los ensayos.
- Planilla de reporte de resultados, donde se colocó de forma sistemática todas las mediciones que se realizaron en el laboratorio de la planta.
- Cámara Fotográfica, utilizada como una herramienta de documentación visual de los ensayos.
- Instrumentos o equipos utilizados para los diferentes ensayos: Recipientes para colocar el material, termómetro de mercurio, termómetros tipo dial, juego de tamices, horno, balanza digital, balanza hidrostática, cucharas, envase rice, bomba de vacío, equipo de prensa Marshall, entre otros.

3.6 Técnicas de Análisis e Interpretación de Datos

Algunos autores tienden a denominarlo análisis de datos. Para Arias (2006) expresa: “En este punto se describen las distintas operaciones a las que serán sometidos los datos que se obtengan: clasificación, registro, tabulación y codificación si fuese el caso.

En los referente al análisis, se definirán las técnicas lógicas (inducción, deducción, análisis, síntesis) o estadísticas (descriptivas o inferenciales), que serán empleadas para descifrar lo que revelan los datos recolectados”. (p.111).

Para Berlson “el análisis de contenido es una técnica para estudiar y analizar la comunicación de manera objetiva, sistemática y cuantitativa”. (p.293).

Las Técnicas de Análisis e Interpretación de Datos, son los procedimientos que se emplean para procesar la información obtenida de los instrumentos de recolección de datos. En este apartado se hace un recuento de los pasos realizados para obtener los resultados y la forma secuencial en que se procesaron, llamado Etapas del Experimento.

3.6.1 Etapas del experimento

En este apartado se explicará de forma secuencial cada uno de los pasos que se realizaron para la ejecución de los diferentes ensayos.

Como ya se mencionó se seleccionaron, para los diseños de la MAC, dos agregados uno (1) proveniente de Cantera “Las Marías”, ubicada en el Edo. Miranda y el segundo (2) proveniente de “Las Minas de Cascabel”, ubicada en el Edo. Carabobo.

Los agregados fueron transportados y almacenados en el laboratorio que se encuentra dentro de la planta de Asfalto Constructora Arpigra, ubicada en la carretera vieja de Petare-Santa Lucía; los mismos estaban separados en dos grupos siendo uno el agregado grueso denominado Arrocillo compuesto por material pasante por el tamiz de 1/2” y retenido

en el tamiz #8; y el otro agregado fino denominado polvillo, el cual es el pasante del tamiz #8 y su contenido llega hasta el material pasante del tamiz # 200.

Para la ejecución de los diferentes ensayos se disponían de 5 sacos de arrocillo y 5 sacos de polvillo tanto del material proveniente de Cantera “Las Marías” como del material proveniente de “Las Minas de Cascabel”. Este material fue debidamente separado utilizando una serie de tamices de diferentes tamaños y colocado en sacos identificados con el tamaño del tamiz y su procedencia; esto con la finalidad de facilitar el trabajo para el momento de realizar los ensayos correspondientes.

Etapa 1: Diseño de la Granulometría utilizada para la mezcla tipo M-12.

Para facilitar la ejecución de los ensayos se realizó una distribución granulométrica de los agregados provenientes de Cantera y Mina, siguiendo las normativas de ASTM C136. Luego de tener esta distribución granulométrica se fabricó una estructura única para los agregados de distinta procedencia, que cumpliera con las especificaciones de SUPERPAVE® para mezclas tipo M-12, con el fin de que esta estructura presentara el mismo comportamiento granulométrico durante todos los ensayos.

El diseño granulométrico está compuesto por una combinación del agregado fino y grueso (arrocillo y polvillo). La distribución de los pesos del material retenido en cada tamiz para la preparación de cada mezcla, se muestran en las tablas del 19 al 23:

Tabla 19: Distribución para la realización del ensayo peso específico retenido en #8

<i>PESADAS PARA PESO ESPECIFICO RETENIDO EN #8</i>		
ARROCILLO	<i>Tamiz</i>	<i>(gr)</i>
	1/2"	150
	3/8"	450
	#4	948
	#8	402
	TOTAL	1950

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Tabla 20: Distribución para la realización del ensayo peso específico pasante #8 retenido en #200

<i>PESADAS PARA PESO ESPECIFICO PASANTE #8 Y RETENIDOS EN #200</i>		
POLVILLO	<i>Tamiz</i>	<i>(gr)</i>
	#16	388
	#30	236
	#50	224
	#100	160
	#200	72
	TOTAL	1080

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Tabla 21: Distribución para la realización del ensayo peso específico pasante #200

PESADAS PARA PESO ESPECIFICO PASANTE #200		
POLVILLO	<i>Tamiz</i>	<i>(gr)</i>
	P200	600
	TOTAL	600

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Tabla 22: Distribución para la realización del ensayo RICE

PESADAS PARA ENSAYO RICE		
	Tamiz	Gramos
ARROCILLO	1/2"	50
	3/8"	150
	#4	316
	#8	134
	#16	97
POLVILLO	#30	59
	#50	56
	#100	40
	#200	18
	p200	80
TOTAL		1000

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Tabla 23: Distribución para la realización del ensayo MARSHALL

PESADAS PARA LAS BRIQUETAS		
ARROCILLO	Tamiz	Gramos
		1/2"
	3/8"	180
	#4	379,2
	#8	160,8
POLVILLO	#16	116,4
	#30	70,8
	#50	67,2
	#100	48
	#200	21,6
	p200	96
TOTAL		1200

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Para lograr cada una de las mezclas se realizaron los siguientes pasos: se secó el material en el horno para eliminar la humedad natural y se dejó enfriar, para luego proceder a separar el material pasando el mismo por una serie de tamices de distintas aberturas, con la ayuda de una tamizadora eléctrica. Cada porción que quedaba retenida en cada tamiz era colocada en sacos identificados por el número del tamiz y la procedencia del agregado.

Etapas II: Caracterización de los agregados.

En esta etapa se realizaron tres ensayos, para cada material proveniente de las diferentes canteras, con la finalidad de determinar los Pesos Específicos Bulk, Aparente y

su respectivo Porcentaje de Absorción; respetando la distribución adecuada a cada ensayo presentado en el punto anterior:

- Primer ensayo: Peso específico del agregado grueso (material retenido en el tamiz #8) respetando las especificaciones de la norma ASTM C127.
- Segundo ensayo: peso específico del agregado fino (material pasante por el tamiz #8 y retenido en el tamiz #200) respetando las especificaciones del método ASTM C128.
- Tercer ensayo: peso específico del agregado fino (Pasante #200) respetando las especificaciones del método ASTM C128.

Etapa III: Ensayo RICE para tiempo cero (0) horas.

En esta etapa previo a la realización del ensayo se procedió a secarla combinación de agregados en el horno durante 24 horas a una temperatura de 110°C tres (3) pesadas de 1000 gr cada una que contenían la distribución de los agregados para el ensayo RICE (ver Tabla 22) mencionada en la Etapa I. Una vez secas las muestras se mezclaron en una sola para su pesaje y cálculo de los gramos de CA con la siguiente fórmula:

$$\text{Gramos de CA} = \frac{\text{Peso seco (gr)} \times \%CA}{100 - \%CA}$$

Se adiciona a la muestra la cantidad de gramos de cemento asfáltico calculado y se procede a mezclar a una temperatura de 160 °C. Luego se procedió a realizar el Ensayo Rice.

Se realizó el ensayo Rice, bajo las especificaciones de la norma ASTM D2041/D2041M-11 al 6,5% de CA (por ser el punto de mayor saturación y con ello reducir

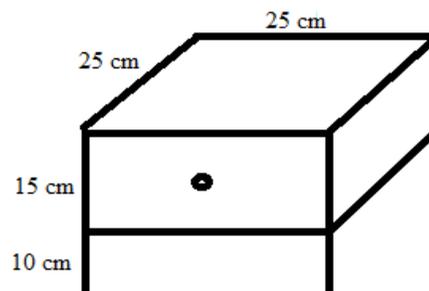
el margen de error), con lo que se determinó la Gravedad Específica Máxima Teórica (Gmm), Peso Específico Efectivo (Gse) y el Porcentaje Máximo de Asfalto Absorbido (Pba).

Etapa IV: Ensayo RICE para los diferentes tiempos de curado (2, 3 y 4 horas)

En esta etapa al igual que en la etapa III se secaron los agregados (3000 gr), se calculó la cantidad de CA y se preparó la MAC al 6,5% de cemento asfáltico. A continuación se realiza una descripción de cada paso ejecutado en la preparación de la mezcla y realización del ensayo RICE:

1. Se prepara la MAC tipo M-12 al 6,5% de cemento asfáltico a una temperatura de mezclado de 160°C.
2. Previo calentamiento del cajón de latón, totalmente sellado, que llamamos “simulador”; se vacía dicha mezcla en el mismo, para ser sometido a una temperatura constante de 160°C en el horno.

Este simulador metálico tendrá las siguientes dimensiones:



3. Se somete la mezcla al tiempo de curado correspondiente (2, 3 y 4 horas), verificando constantemente con un termómetro tipo dial que dicha mezcla se mantuviera a una temperatura de 160°C.
4. Cumplido cada tiempo de curado el simulador junto a la mezcla es sacada del horno. La MAC se separó en agregado grueso y fino utilizando el tamiz de 3/8", que fue previamente calentado, para de esta forma mantener la dosificación de la mezcla; evitando los errores de proporcionalidad que pudieran afectar el resultado del ensayo.
5. Se toman tres muestras representativas y se procede a la realización del Ensayo Rice según las especificaciones de la norma ASTM D2041/D2041M-11 (ver Anexo E), con lo que se determinó los valores Gmm, Gse y Pba para cada tiempo de curado.

Etapa V: Metodología RAMCODES®

Con los valores de Peso Específico Bulk y Peso Específico Efectivo de la combinación de agregados (Ensayo Rice), obtenidos en la etapa II y III, respectivamente, y el valor del Peso específico del asfalto tipo A-30 a una temperatura de 25°C se utilizó el “Calculador del Polígono de Vacíos” (RAMCODES®) para hallar el contenido óptimo de asfalto de la mezcla que se dispuso para la fabricación de las briquetas (Ensayo MARSHALL).

Etapa VI: Diseño de Mezclas según el Método MARSHALL para cero (0) horas

En esta etapa previo a la realización del ensayo se secaron en el horno a una temperatura de 110°C las tres (03) pesadas de 1200 gr cada una que contenían la distribución de los agregados para el Ensayo Marshall (ver Tabla 23) durante 24 horas, se mezclaron las tres pesadas con el contenido óptimo de asfalto calculado previamente en la etapa V con el método RAMCODES® y se procedió a la preparación de las briquetas a una

temperatura de compactación de 140°C según norma ASTM D6926-10 y se sometió las briquetas a la prensa MARSHALL según norma ASTM D6927-05^{e1} (ver Anexo E), con los cuales se obtuvieron los valores de densidad, estabilidad y flujo.

Etapa VII: Diseño de Mezclas según el Método MARSHALL para el tiempo de curado de 4 horas

Al igual que en la etapa VI se secaron los agregados (3600 gr), se calculó la cantidad de CA y se preparó la MAC con el contenido óptimo de asfalto calculado con RAMCODES®. A continuación se realiza una descripción de cada paso ejecutado en la realización del ensayo:

1. Se prepara la mezcla tipo M-12 con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico a la temperatura de mezclado de 160°C.
2. Previo calentamiento del “simulador”, se vacía dicha mezcla en el mismo, para ser sometido a una temperatura constante de 160°C en el horno.
3. Se somete la mezcla al tiempo de curado correspondiente a cuatro (4) horas, controlando que la mezcla mantuviera una temperatura de 160°C.
4. Se preparan las briquetas de acuerdo a la norma ASTM D2926-10 a una temperatura de compactación de 140°C y se obtuvieron los valores de densidad, estabilidad y flujo según norma ASTM D6927-05^{e1} (ver Anexo E).

3.7 Confiabilidad y Validez

“En rasgos generales se define la confiabilidad como la capacidad del instrumento arrojar datos o mediciones que corresponden a la realidad que se pretende conocer... Un

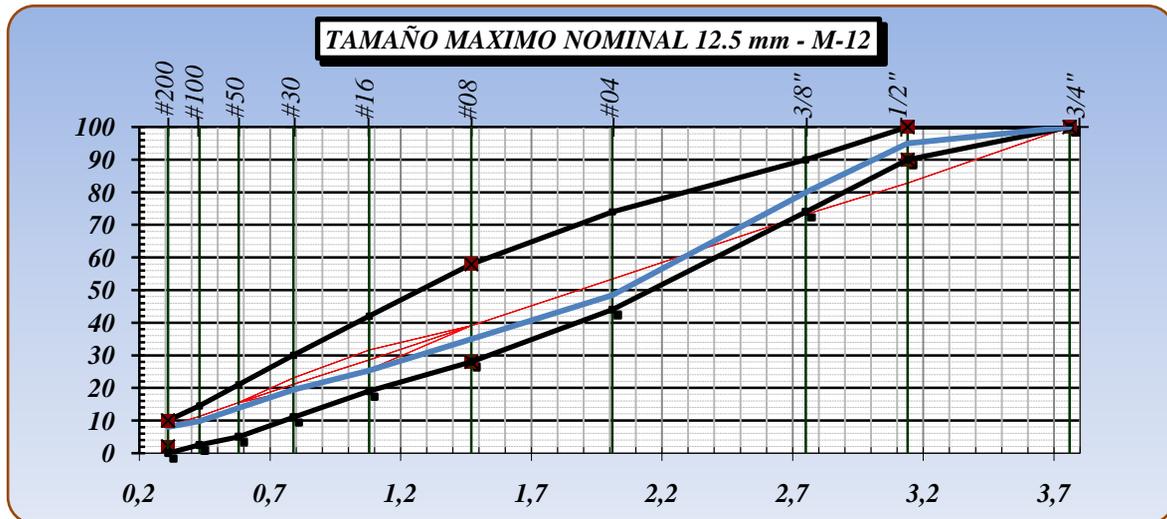
instrumento será confiable en la medida que los valores que se obtengan representa los valores reales en la variable medida”. (José Yuri y Claudio Urbano, 2006, p. 34).

“La validez de un instrumento de recolección de información es definido como la propiedad del instrumento para medir/observar lo que se pretende medir/observar. Esta condición es fundamental para obtener la confiabilidad, ya que por más precauciones que se tengan para obtener la información, si ésta no es un referente empírico adecuado de la variable teórica, los datos no serán ni válidos ni confiables”. (José Yuri y Claudio Urbano, 2006, p. 34).

Dadas las exigencias de la investigación se realizaron controles rigurosos para la calibración de los equipos con la finalidad de asegurar la calidad de los ensayos realizados y que los mismos estuvieran dentro de la normativa asociada a cada una de ellas.

CAPITULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Diseño de la Estructura Granulométrica tipo M-12, utilizada para ambos tipos de agregados (Cantera Las Marías y Las Minas de Cascabel)



Tamices	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
pasantes	100	95	80	48,4	35	25,3	19,4	13,8	9,8	8
Especf.	100	100/90	90/74	74/44	58/28	42/19	30/11	21/5	14,5/2,5	.10/2

	% de la muestra
Arrocillo	86,97
Polvillo	13,03

Gráfico 1: Estructura Granulométrica utilizada para los diferentes tipos de agregados

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

En el gráfico 1 presentado, se muestran los límites dados por las especificaciones SUPERPAVE® para la gradación de una mezcla tipo M-12, donde la curva azul es la que representa el comportamiento granulométrico que se utilizó en el laboratorio tanto para los

agregados provenientes de Cantera “Las Marías” y de “Las Minas de Cascabel”, la curva roja está compuesta por la zona restringida, los puntos de control y el tamaño máximo, las curvas negras son los límites granulométricos de la mezcla. Este diseño se conservó para la realización de los diferentes ensayos con el fin de evitar que otras variables pudieran afectar los mismos.

4.2 Pesos Específicos de los Agregados

4.2.1 Peso Específico de Agregados de Cantera

Tabla 24: Peso Específico para Agregado Grueso (Retenido en el tamiz #8)

PESO ESPECÍFICO RETENIDOS EN EL TAMIZ #8				DESVIACIÓN ESTANDAR	
MUESTRA N°	6	2	3	CALC	PERM
PESO MUESTRA SSS EN AIRE	385,9	286,7	257		
PESO EN AGUA	240,7	178,4	160,2		
PESO SECO EN AIRE	380,8	282,8	253,6		
AGUA ABSORBIDA	5,1	3,9	3,4		
VOLUMEN DE MUESTRA	145,2	108,3	96,8		
PESO ESPECÍFICO BULK	2,623	2,611	2,62		
PESO ESPECÍFICO SSS	2,658	2,647	2,655		
PESO ESPECÍFICO APARENTE	2,718	2,709	2,715		
TEMPERATURA DE ENSAYO °C	23	23	23		
FACTOR REFERIDO A 23°C	1	1	1		
PESO ESPECÍFICO BULK A 23°C	2,623	2,611	2,620	0,006	0,009
PESO ESPECÍFICO SSS A 23°C	2,658	2,647	2,655	0,005	0,007
PESO ESPECÍFICO APARENTE A 23°C	2,718	2,709	2,715	0,005	0,007
% ABSORCIÓN	1,339	1,379	1,341	0,023	0,088
PROMEDIO PESO ESPECÍFICO BULK A 23°C	2,618				
PROMEDIO PESO ESPECÍFICO SSS A 23°C	2,653				
PROMEDIO PESO ESPECÍFICO APARENTE A 23°C	2,714				
PROMEDIO DE % ABSORCIÓN	1,353				

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

En la Tabla 24 se presentan los resultados obtenidos del Ensayo de Peso Específico retenido en el tamiz #8 de los agregados de Cantera; estos resultados cumplen con la Desviación Estándar permitida según la Norma ASTM C127.

Tabla 25: Peso específico para Agregado Fino (Pasante #8 retenido en #200)

PESO ESPECÍFICO PASANTE #8 Y RETENIDOS EN #200				DESVIACIÓN ESTANDAR	
MUESTRA N°	1	3	1	CALC	PERM
PESO MATRAZ + TAPA + MUESTRA SSS	427,2	433	452,9		
PESO MATRAZ + TAPA	271,5	271,5	271,5		
PESO MUESTRA SSS	155,7	161,5	181,4		
PESO MUESTRA SECA	151,9	157,4	176,6		
PESO MATRAZ + TAPA + MUESTRA +AGUA	863,5	869,8	879,8		
PESO MATRAZ + TAPA + AGUA	766,63	769,37	766,77		
VOLUMEN MUESTRA	58,83	61,07	68,37		
PESO ESPECÍFICO BULK	2,582	2,577	2,583		
PESO ESPECÍFICO SSS	2,647	2,645	2,653		
PESO ESPECÍFICO APARENTE	2,76	2,763	2,778		
TEMPERATURA DE ENSAYO °C	28	28	27		
FACTOR REFERIDO A 23°C	0,998692	0,998692	0,998972		
PESO ESPECÍFICO BULK A 23°C	2,579	2,574	2,580	0,003	0,011
PESO ESPECÍFICO SSS A 23°C	2,643	2,641	2,65	0,0050	0,0095
PESO ESPECÍFICO APARENTE A 23°C	2,76	2,759	2,775	0,0089	0,0095
% ABSORCIÓN	2,502	2,605	2,718	0,11	0,11
PROMEDIO PESO ESPECÍFICO BULK A 23°C	2,578				
PROMEDIO PESO ESPECÍFICO SSS A 23°C	2,645				
PROMEDIO PESO ESPECÍFICO APARENTE A 23°C	2,765				
PROMEDIO DE % ABSORCIÓN	2,608				

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

En la Tabla 25 se presentan los resultados obtenidos del Ensayo de Peso Específico pasante del tamiz #8 y retenido en #200 de los agregados de Cantera; estos resultados cumplen con la Desviación Estándar permitida según la Norma ASTM C128.

Tabla 26: Peso Específico para Agregado Fino (pasante #200)

PESO ESPECÍFICO PASANTE #200			DESVIACIÓN ESTANDAR	
MUESTRA N°	1	3	CALC	PERM
PESO MATRAZ + TAPA + MUESTRA SECA	385,6	414,6		
PESO MATRAZ + TAPA	271,5	271,5		
PESO MUESTRA SECA	114,1	143,1		
PESO MATRAZ + TAPA + MUESTRA +AGUA	838,3	859,4		
PESO MATRAZ + TAPA + AGUA	766,49	769,37		
VOLUMEN MUESTRA	42,29	53,07		
PESO ESPECÍFICO APARENTE	2,698	2,696		
TEMPERATURA DE ENSAYO °C	29	28		
FACTOR REFERIDO A 23°C	0,998402	0,998692		
PESO ESPECÍFICO APARENTE A 23°C	2,694	2,693		
PROMEDIO PESO ESPECÍFICO APARENTE A 23°C	2,694			

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

En la Tabla 26 se presentan los resultados obtenidos del Ensayo de Peso Específico pasante #200 de los agregados de Cantera; estos resultados cumplen con la Desviación Estándar permitida según la Norma ASTM C128.

Tabla 27: Resumen de los pesos específicos promedios de los Agregados provenientes de Cantera

RESUMEN Y PROMEDIO DE LOS PESOS ESPECÍFICOS							
PESOS ESPECÍFICOS BULK				PESOS ESPECÍFICOS APARENTE			
RET #8	RET #200	PASA #200	PROMEDIO	RET #8	RET #200	PASA #200	PROMEDIO
2,618	2,578	2,694	2,63	2,714	2,765	2,694	2,724

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

4.2.2 Peso Específico de Agregados de Mina

Tabla 28: Peso específico para Agregado grueso (Retenido en el tamiz #8)

PESO ESPECÍFICO RETENIDOS EN EL TAMIZ #8				DESVIACIÓN ESTANDAR	
MUESTRA N°	1	2	3	CALC	PERM
PESO MUESTRA SSS EN AIRE	347,8	370,7	269,1		
PESO EN AGUA	219,6	233,7	169,4		
PESO SECO EN AIRE	341,3	362,6	263,7		
AGUA ABSORBIDA	6,5	8,1	5,4		
VOLUMEN DE MUESTRA	128,2	137	99,7		
PESO ESPECÍFICO BULK	2,660	2,650	2,650		
PESO ESPECÍFICO SSS	2,710	2,710	2,700		
PESO ESPECÍFICO APARENTE	2,800	2,810	2,800		
TEMPERATURA DE ENSAYO	23	23	23		
FACTOR REFERIDO A 23°C	1	1	1		
PESO ESPECÍFICO BULK A 23°C	2,660	2,650	2,650		
PESO ESPECÍFICO SSS A 23°C	2,713	2,706	2,699	0,01	0,007
PESO ESPECÍFICO APARENTE A 23°C	2,800	2,810	2,800	0,01	0,007
% ABSORCIÓN	1,900	2,230	2,050	0,17	0,088
PROMEDIO PESO ESPECÍFICO BULK A 23°C	2,652				
PROMEDIO PESO ESPECÍFICO SSS A 23°C	2,706				
PROMEDIO PESO ESPECÍFICO APARENTE A 23°C	2,803				
PROMEDIO DE % ABSORCIÓN	2,060				

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

En la Tabla 28 se presentan los resultados obtenidos del Ensayo de Peso Específico Retenido en el tamiz #8 de los agregados de Mina; estos resultados cumplen con la Desviación Estándar permitida por la Norma ASTM C127.

Tabla 29: Peso Específico para Agregado Fino (Pasante #8 retenido en #200)

PESO ESPECÍFICO PASANTE #8 Y RETENIDOS EN #200				DESVIACIÓN ESTANDAR	
MUESTRA N°	1	3	1	CALC	PERM
PESO MATRAZ + TAPA + MUESTRA SSS	486,2	508,1	447,1		
PESO MATRAZ + TAPA	271,5	271,5	271,5		
PESO MUESTRA SSS	214,7	236,6	175,6		
PESO MUESTRA SECA	206	227,5	168,6		
PESO MATRAZ + TAPA + MUESTRA +AGUA	902,1	918,5	877,3		
PESO MATRAZ + TAPA + AGUA	766,77	769,64	766,9		
VOLUMEN MUESTRA	79,37	87,74	65,2		
PESO ESPECÍFICO BULK	2,595	2,593	2,586		
PESO ESPECÍFICO SSS	2,705	2,697	2,693		
PESO ESPECÍFICO APARENTE	2,910	2,893	2,897		
TEMPERATURA DE ENSAYO °C	27	26	26		
FACTOR REFERIDO A 23°C	0,998972	0,999244	0,999244		
PESO ESPECÍFICO BULK A 23°C	2,593	2,591	2,584	0,004	0,011
PESO ESPECÍFICO SSS A 23°C	2,702	2,695	2,691	0,0057	0,0095
PESO ESPECÍFICO APARENTE A 23°C	2,907	2,891	2,895	0,0083	0,0095
% ABSORCIÓN	4,223	4	4,152	0,11	0,11
PROMEDIO PESO ESPECÍFICO BULK A 23°C	2,589				
PROMEDIO PESO ESPECÍFICO SSS A 23°C	2,696				
PROMEDIO PESO ESPECÍFICO APARENTE A 23°C	2,898				
PROMEDIO DE % ABSORCIÓN	4,125				

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

En la Tabla 29 se presentan los resultados obtenidos del Ensayo de Peso Específico Pasante en el tamiz #8 y retenido en #200 de los agregados de Mina; estos resultados cumplen con la Desviación Estándar permitida por la Norma ASTM C128.

Tabla 30: Peso específico para Agregado Fino (Pasante #200)

PESO ESPECÍFICO PASANTE #200			DESVIACIÓN ESTANDAR	
MUESTRA N°	1	3	CALC	PERM
PESO MATRAZ + TAPA + MUESTRA SECA	433,2	393,6		
PESO MATRAZ + TAPA	271,5	271,5		
PESO MUESTRA SECA	161,7	122,1		
PESO MATRAZ + TAPA + MUESTRA +AGUA	868,9	846,5		
PESO MATRAZ + TAPA + AGUA	766,84	769,51		
VOLUMEN MUESTRA	59,64	45,11		
PESO ESPECÍFICO APARENTE	2,711	2,707		
TEMPERATURA DE ENSAYO °C	26,5	27		
FACTOR REFERIDO A 23°C	0,999109	0,998972		
PESO ESPECÍFICO APARENTE A 23°C	2,709	2,704		
PROMEDIO PESO ESPECÍFICO APARENTE A 23°C	2,707			

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

En el Tabla 30 se presentan los resultados obtenidos del Ensayo de Peso Específico Pasante #200 de los agregados de Mina; estos resultados cumplen con la Desviación Estándar permitida por la Norma ASTM C128.

Tabla 31: Resumen de los pesos específicos promedios de los Agregados provenientes de Mina

RESUMEN Y PROMEDIO DE LOS PESOS ESPECÍFICOS							
PESOS ESPECÍFICOS BULK				PESOS ESPECÍFICOS APARENTE			
RET #8	RET #200	PAS #200	PROMEDIO	RET #8	RET #200	PAS #200	PROMEDIO
2,652	2,589	2,707	2,649	2,803	2,898	2,707	2,803

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

4.3 Diseño de las Mezclas según la Metodología RAMCODES®.

A continuación se muestran los resultados obtenidos, según ensayos requeridos para dicho método. Para determinar el porcentaje óptimo de asfalto se utilizó el “Calculador del Polígono de Vacíos”, Metodología RAMCODES®. Para la fabricación de las mezclas se utilizó una muestra única de asfalto A-30 suministrado por PDVSA cuya Gravedad Específica (Gb) a 25°C es de 1,017.

4.3.1 Diseño de las mezclas según la Metodología RAMCODES® para los Agregados provenientes de Cantera

4.3.1.1 Densidad Máxima Teórica (valor RICE)

Tabla 32: Resultados de Densidad Máxima Teórica (valor RICE)

MUESTRA					1	2
% Cemento Asfáltico	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	6,5
Peso Del Frasco					2693,6	2693,6
Peso de Frasco + Agua					7248,4	7248,4
Peso de Frasco + Muestra					3742,7	3717,7
Peso de la Muestra					1049,10	1024,10
Peso de Frasco + Muestra + Agua					7868,8	7854,4
Suma de Peso					8297,50	8272,50
Peso de un Volumen de agua igual a Muestra					428,70	418,10
Temperatura del Ensayo					29,0	29,0
RICE a la temperatura del Ensayo					2,447	2,449
Factor para 25 °C :					0,9989	0,998896
RICE de la Mezcla para 25 °C :	2,521	2,502	2,483	2,464	2,444	2,447
Peso Especifico Efectivo:	2,711	2,711	2,711	2,711	2,709	2,712

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Al realizar el Ensayo RICE, bajo las especificaciones de la Norma ASTM D2041/D2041M-11, se obtuvo una Desviación Estándar calculada de 0,002 siendo un valor aceptable, puesto que la misma Norma establece un valor de Desviación Estándar permitida de 0,0080. Por la importancia de la investigación y precisión que se requiere para la misma se planteo una desviación mucho más exigente.

Realizando los diferentes cálculos, para la mezcla cuyo contenido de cemento asfáltico es de 6,5%, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 33:

Tabla 33: Resultados promedio de Ensayo RICE para Agregado de Cantera

<i>Promedio de la Densidad Máxima Teórica de la mezcla</i>	Gmm	2,446
<i>Promedio Peso Específico Efectivo</i>	Gse	2,710
<i>% de vacíos</i>	%	4,9
<i>Asfalto absorbida</i>	Pba	0,011
<i>Contenido de asfalto efectivo</i>	Pbe	6,489
<i>% de Asfalto Absorbido</i>	Pba	1,149

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Se buscaron analíticamente los RICE virtuales o valores de Densidad Máxima Teórica para los demás puntos de cemento asfáltico tomados en cuenta en el diseño, que no fueron considerados en la realización del ensayo RICE. Para esto se utilizó el Peso Específico Efectivo de la Mezcla (Gse), valor que se mantiene constante para todos los porcentajes de asfalto en la mezcla.



Gráfico 2: Densidad Máxima Teórica con agregado de Cantera para los diferentes porcentajes de cemento asfáltico

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Con los resultados obtenidos en el gráfico 2, utilizando el porcentaje óptimo de cemento asfáltico calculado con la metodología RAMCODES®, se determinó el valor de Densidad Máxima Teórica que se utilizará en el ensayo MARSHALL para hallar los valores de vacíos (V_t , V_{II}).

4.3.1.2 Metodología RAMCODES® para obtener el cemento óptimo de asfalto

Para emplear esta metodología se necesitaron los valores de Gravedad Específica del Cemento Asfáltico A-30 (Gb) a 25°C, Peso Específico Bulk, Peso Específico Efectivo del Ensayo RICE no curado, estos dos últimos valores se obtuvieron al realizar los ensayos de caracterización del agregado (ASTM C127 y ASTM C128) y ensayo RICE bajo las especificaciones de la Norma D2041/D2041M-11.

Tabla 34: Resultados del método RAMCODES® para los agregados de Cantera



Polyvoids(TM)

RAMCODES Online

April 26th, 2013

CentroidCoordinates			
n:	5	Pb avg:	5,24
		Gmbavg:	2,385
PolyvoidsVertices			
points:	Pb:	Gmb:	
5	4,67	2,4	
6	5,19	2,413	
7	5,89	2,375	
4	5,38	2,363	
10	5,06	2,374	
5	4,67	2,4	

Fuente: www.ramcodes.com

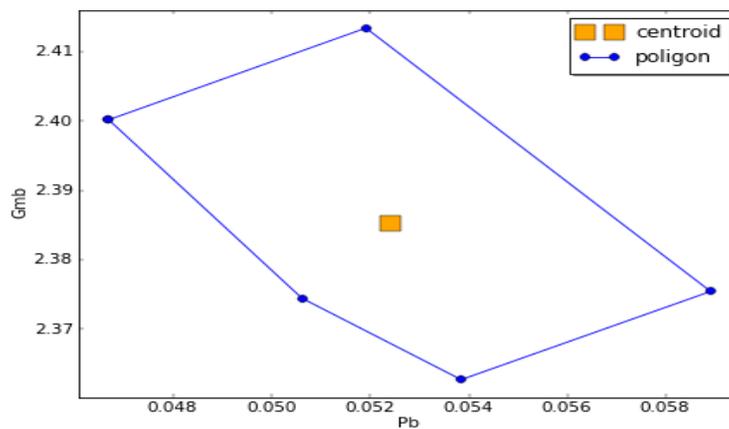


Gráfico 3: Generada por el Método RAMCODES® para agregados provenientes de Cantera

Fuente: www.ramcodes.com

Con este resultado obtenido de porcentaje óptimo de asfalto para el agregado proveniente de Cantera, se procedió a realizar el ensayo MARSHALL según las especificaciones de las Normas ASTM D6926-10 y ASTM D6927-05^{e1}, para determinar las propiedades MARSHALL.

4.3.1.3 Ensayo MARSHALL para los Agregados de Cantera de la Mezcla No Curada

Tabla 35: Resultados Ensayo MARSHALL de la Mezcla No curada

%CA	LAS MARIAS - PROPIEDADES MARSHALL DE LA MAC										
	ESTABILIDAD			Peso Aire	Peso Sumergido	PSSS	VOLUMEN	DENSIDAD	FLUJO	D.E	%CV
		D.E	%CV								
5,24	3022	0	0	1246,5	722,9	1247,9	525	2,374	10	0	0
	3022			1243,3	722,2	1245,5	523,3	2,376	10		
	3022			1239,5	722,3	1244	521,7	2,376	10		
	3022	Según ASTM: %CV = 6						2,375	10	Según ASTM: %CV = 9	

RICE Y VACIOS DE LA MAC			
RICE	VT	VAM	VLL
2,497	4,9	14,4	66,2

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Tabla 36: Propiedades MARSHALL comparadas con el criterio de la Norma INVEAS (aprobada parcialmente por FONDONORMA), Briqueta No curada con un porcentaje óptimo de asfalto de 5,24%.

Propiedades MARSHALL	Unidad de Medición	Valor Obtenido	Criterio según Norma	Cumple
Densidad	g/cm ³	2,497	Ninguno	Sí
Estabilidad	Lbs.	3022	mínimo 2200	Sí
Flujo	0,001 pulg	10	8-14	Sí
Vv	%	4,9	3-5	Sí
VAM	%	14,4	14,9	Sí
Vll	%	66,2	65-75	Sí

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Como se puede observar en la Tabla 36, los resultados de las propiedades MARSHALL obtenidos al realizar el ensayo, están dentro los límites permitidos por la Norma Venezolana.

4.3.2 Diseño de las mezclas según la Metodología RAMCODES® para agregados proveniente de Mina.

4.3.2.1 Densidad Máxima Teórica con Agregado de Mina (valor RICE)

Tabla 37: Resultados de Densidad Máxima Teórica (valor RICE)

MUESTRA					1	2
% Cemento Asfáltico	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	6,5
Peso Del Frasco					2693,6	2693,6
Peso de Frasco + Agua					7249,3	7250,2
Peso de Frasco + Muestra					3727,6	3716,2
Peso de la Muestra					1034,00	1022,60
Peso de Frasco + Muestra + Agua					7872,3	7866,1
Suma de Peso					8283,30	8272,80
Peso de un Volumen de agua igual a Muestra:					411,00	406,70
Temperatura del Ensayo					28,0	27,0
RICE a la temperatura del Ensayo					2,516	2,514
Factor para 25 °C					0,9992	0,9995
RICE de la Mezcla para 25 °C	2,595	2,574	2,554	2,533	2,514	2,513
Peso Especifico Efectivo:	2,800	2,800	2,800	2,800	2,801	2,800

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Al realizar el Ensayo RICE, bajo las especificaciones de la Norma ASTM D2041/D2041M-11, se obtuvo una Desviación Estándar calculada de 0,001 siendo un valor aceptable, puesto que la misma Norma establece un valor de Desviación Estándar permitida de 0,0080.

Realizando los diferentes cálculos, para la mezcla cuyo contenido de cemento asfáltico es de 6,5%, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 38: Resultados promedios del Ensayo RICE de los agregados de Mina

<i>Promedio de la Densidad Máxima Teórica de la mezcla</i>	Gmm	2,513
<i>Promedio Peso Específico Efectivo</i>	Gse	2,800
<i>% de vacíos</i>	%	3,4
<i>Asfalto absorbida</i>	Pba	0,021
<i>Contenido de asfalto efectivo</i>	Pbe	6,481
<i>% de Asfalto Absorbido</i>	Pba	2,065

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Se buscaron analíticamente los RICE virtuales o valores de Densidad Máxima Teórica para los demás puntos de cemento asfáltico tomados en cuenta en el diseño, que no fueron considerados en la realización del ensayo RICE. Para esto se empleó el Peso Específico Efectivo de la Mezcla (Gse), valor que se mantiene constante para todos los porcentajes de asfalto en la mezcla.

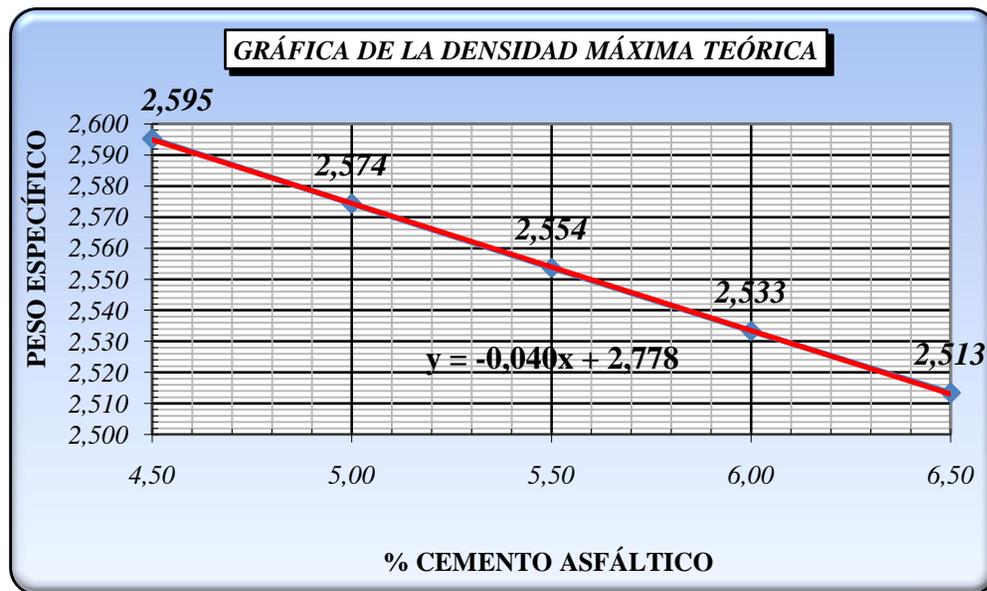


Gráfico 4: Densidad Máxima Teórica del Agregado de Mina para los diferentes porcentajes de cemento asfáltico

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Con los resultados obtenidos en el gráfico 4, utilizando el porcentaje óptimo de cemento asfáltico calculado con la metodología RAMCODES®, se determinó el valor de Densidad Máxima Teórica que se utilizará en el ensayo MARSHALL para hallar los valores de vacíos (V_t , V_{II}).

4.3.2.2 Metodología RAMCODES® para obtener el cemento óptimo de asfalto del Agregado proveniente de Mina.

Para poder emplear esta metodología se necesitaron los valores de Gravedad Específica del cemento asfáltico A-30 (Gb) a 25°C, Peso Especifico Bulk, Peso Especifico Efectivo del Rice No Curado, estos dos últimos se obtuvieron al realizar los ensayos de caracterización del agregado (ASTM C127 y ASTM C128) y Ensayo RICE bajo las especificaciones de la Norma ASTM D2041/D2041M-11.

Tabla 39: Resultados del método RAMCODES® para los agregados de Mina



Polyvoids(TM)
RAMCODES Online
April 26th, 2013

CentroidCoordinates			
n:	5	Pb avg:	6,04
		Gmbavg:	2,423
PolyvoidsVertices			
points:	Pb:	Gmb:	
5	5,48	2,438	
6	5,99	2,452	
7	6,67	2,413	
4	6,18	2,4	
10	5,86	2,412	
5	5,48	2,438	

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

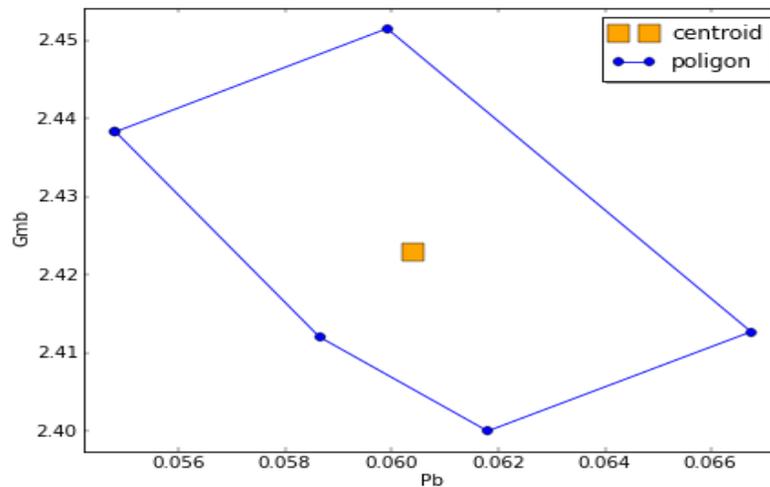


Gráfico 5: Generada por el método RAMCODES® para los Agregados provenientes de Mina

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Con este resultado de porcentaje óptimo de asfalto para el agregado proveniente de Mina, se realizó el ensayo MARSHALL según las especificaciones de las Normas ASTM D6926-10 y ASTM D6927-05^{e1}, para determinar las propiedades MARSHALL.

4.3.2.3 Ensayo MARSHALL para Agregado de Mina de la Mezcla No Curada.

Tabla 40: Resultados del ensayo MARSHALL de la Mezcla No Curada.

%CA	CASCABEL - PROPIEDADES MARSHALL DE LA MAC										
	ESTABILIDAD			Peso Aire	Peso Sumergido	PSSS	VOLUMEN	DENSIDAD	FLUJO	D.E	%CV
		D.E	%CV								
6,04	3320	46,76	1	1247	739,3	1247,6	508,3	2,453	12	0	0
	3227			1246	738,4	1246,7	508,3	2,451	12		
	3273			1246,7	738,8	1248	509,2	2,448	12		
	3273	Según ASTM: %CV = 6						2,451	12	Según ASTM: %CV = 9	

RICE Y VACIOS DE LA M.A.C.			
RICE	VT	VAM	VLL
2,536	3,4	13,1	74,3

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Tabla 41: Propiedades MARSHALL comparadas con el criterio de la Norma INVEAS (aprobada por FONDONORMA) Briqueta no curada con un porcentaje óptimo de asfalto de 6,04%.

Propiedades MARSHALL	Unidad de Medición	Valor Obtenido	Criterio según Norma	Cumple
<i>Densidad</i>	g/cm ³	2,451	Ninguno	Sí
<i>Estabilidad</i>	Lbs.	3274	mínimo 2200	Sí
<i>Flujo</i>	0,001 pulg	12	8-14	Sí
<i>V_v</i>	%	3,4	3-5	Sí
<i>VAM</i>	%	13,1	14	No
<i>V_l</i>	%	74,3	65-75	Sí

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Como se puede observar en la Tabla 41, los resultados de las propiedades MARSHALL obtenidos al realizar el ensayo, están dentro los límites permitidos por la Norma Venezolana.

4.4 Diseño de las mezclas según la metodología MARSHALL con la inclusión del tiempo de curado

4.4.1 Ensayo RICE para la Mezcla Curada

4.4.1.1 Ensayo RICE para la Mezcla Curada con Agregados provenientes de Cantera

Tabla 42: Densidad Máxima de la mezcla (valor de RICE) para los diferentes tiempos de curado

TIEMPO DE CURADO DE LA MEZCLA	0 HORAS		2 HORAS		3 HORAS		4 HORAS	
% Cemento asfáltico	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Peso del frasco + tapa	2693,6	2693,6	2693,6	2693,6	2693,6	2693,6	2693,6	2693,6
Peso del frasco + tapa + agua	7248,4	7248,4	7248,4	7249,3	7248,4	7249,3	7251	7251,9
Peso del frasco + tapa + muestra	3742,7	3717,7	3962,2	3962,1	3960,9	3961,3	3944,9	3945,9
Peso de la muestra	1049,1	1024,1	1268,6	1268,5	1267,3	1267,7	1251,3	1252,3
Peso del frasco + tapa + muestra + agua después del vacío	7868,8	7854,4	8003,4	8004,1	8003,3	8004,2	7996,8	7998,5
Suma de peso	8297,5	8272,5	8517	8517,8	8515,7	8517	8502,3	8504,2
Peso de un volumen de agua igual a muestra	428,7	418,1	513,6	513,7	512,4	512,8	505,5	505,7
Temperatura de ensayo	29°C	29°C	29	28	29	28	26	25
RICE a la temperatura del ensayo	2,447	2,449	2,470	2,469	2,473	2,472	2,475	2,476
Factor para 25°C	0,9989	0,998896	0,998896	0,99919	0,9989	0,99919	0,9997	1
Rice de la mezcla para 25°C	2,444	2,447	2,467	2,467	2,471	2,470	2,475	2,476
Desviación estándar	0,002		0,000		0,000		0,001	
Peso específico efectivo	2,709	2,712	2,739	2,739	2,743	2,742	2,749	2,751
Promedio de la Densidad Máxima Teórica de la mezcla para 6,5%	2,446		2,467		2,470		2,476	
Promedio Peso específico efectivo	2,710		2,739		2,743		2,750	
% de vacíos	4,9		-		-		7,7	
Asfalto absorbida	0,011		0,015		0,016		0,017	
Contenido de asfalto efectivo	6,489		6,486		6,485		6,484	
% de asfalto absorbido	1,149		1,541		1,568		1,687	

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Con los valores de Densidad Máxima Teórica de la mezcla obtenidos de los diversos ensayos cuya variable fija fue el tiempo de curado se elabora el siguiente gráfico, se puede observar en el gráfico 6 el aumento proporcional de los resultados del RICE a medida que va aumentando el tiempo.

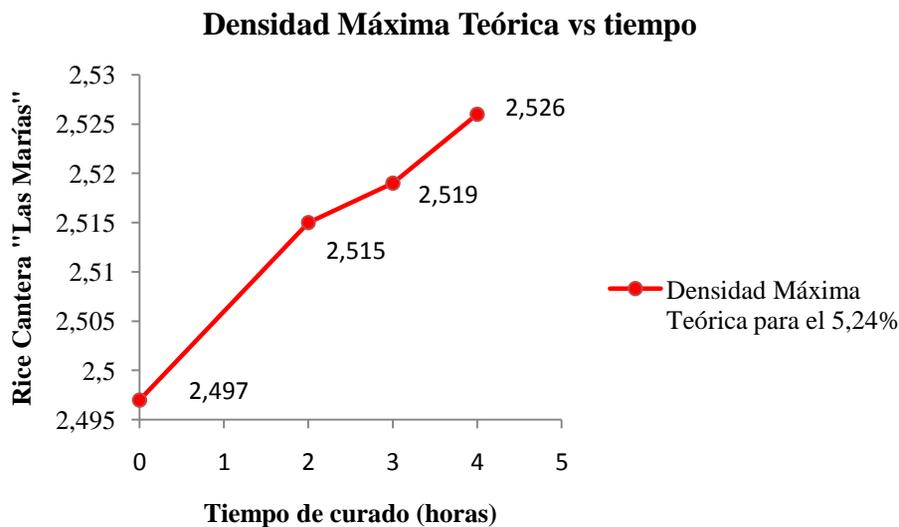


Gráfico 6: Aumento proporcional de la Densidad Máxima Teórica a medida que va aumentando el tiempo de los Agregados provenientes de Cantera.

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Al analizar el gráfico 6 se observa que existe un aumento importante de la Densidad Máxima Teórica cuyo valor correspondiente al obtenido en el tiempo de cero (0) horas, en comparación al obtenido en el tiempo de cuatro (4) horas; presenta una variación de 29 Kg. También se observa que a medida que aumenta el valor del RICE el Porcentaje de Asfalto Absorbido será mayor, lo que afectará en cierta proporción el diseño de la mezcla.

4.4.1.2 Ensayo RICE para Mezcla Curada con agregados provenientes de Mina

Tabla 43: Densidad Máxima de la mezcla (valor de RICE) para los diferentes tiempos de curado

TIEMPO DE CURADO DE LA MEZCLA	0 HORAS		2 HORAS		3 HORAS		4 HORAS	
% Cemento asfáltico	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Peso del frasco + tapa	2693,6	2693,6	2693,6	2693,6	2693,6	2693,6	2693,6	2693,6
Peso del frasco + tapa + agua	7249,3	7250,2	7252,8	7249,3	7248,4	7248,4	7249,3	7249,3
Peso del frasco + tapa + muestra	3727,6	3716,2	3727,8	3725,5	3740,2	3739,3	3727,4	3727,6
Peso de la muestra	1034	1022,6	1034,2	1031,9	1046,6	1045,7	1033,8	1034
Peso del frasco + tapa + muestra + agua después del vacío	7872,3	7866,1	7877,3	7873	7881,6	7881,1	7874,9	7875,1
Suma de peso	8283,3	8272,8	8287	8281,2	8295	8294,1	8283,1	8283,3
Peso de un volumen de agua igual a muestra	411	406,7	409,7	408,2	413,4	413	408,2	408,2
Temperatura de ensayo	28°C	27°C	24	28	29	28	28	28
RICE a la temperatura del ensayo	2,516	2,514	2,524	2,528	2,532	2,532	2,533	2,533
Factor para 25°C	0,99919	0,9995	1,0003	0,9992	0,9989	0,9992	0,9992	0,9992
Rice de la mezcla para 25°C	2,514	2,513	2,525	2,526	2,529	2,530	2,531	2,531
Desviación estándar	0,001		0,001		0,001		0,000	
Peso específico efectivo	2,800	2,799	2,815	2,816	2,820	2,822	2,822	2,823
Promedio de la Densidad Máxima Teórica de la mezcla para 6,5%	2,513		2,525		2,529		2,531	
Promedio Peso específico efectivo	2,800		2,816		2,821		2,823	
% de vacíos	3,4		-		-		10,1	
Asfalto absorbida	0,021		0,023		0,023		0,024	
Contenido de asfalto efectivo	6,481		6,479		6,478		6,478	
% de asfalto absorbido	2,065		2,271		2,339		2,362	

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Con los valores de Densidad Máxima Teórica de la mezcla obtenidos de los diversos ensayos cuya variable fija fue el tiempo de curado se elabora el siguiente gráfico, en donde se observa el aumento proporcional de los resultados del RICE a medida que va aumentando el tiempo de curado.

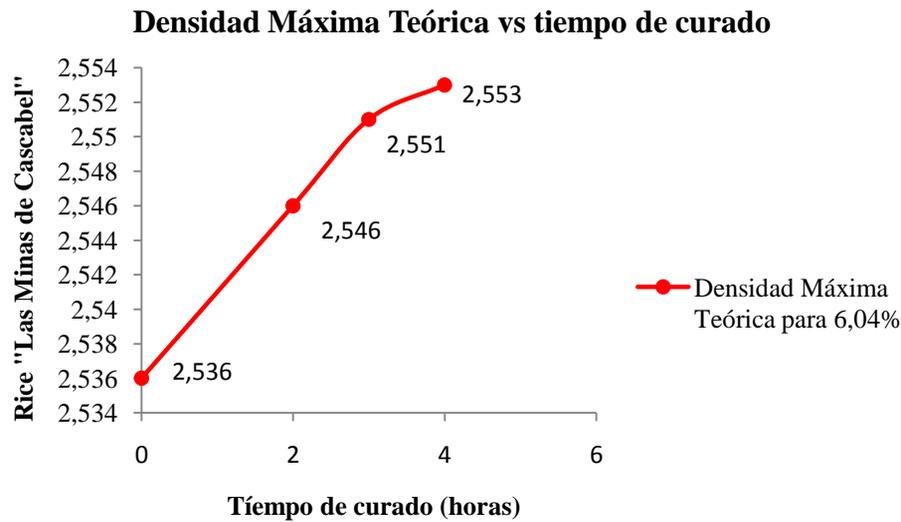


Gráfico 7: Aumento proporcional de la Densidad Máxima Teórica a medida que va aumentando el tiempo de curado de los Agregados provenientes de Mina

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Al analizar el gráfico 7 se observa que existe un aumento significativo de la Densidad Máxima Teórica cuyo valor obtenido en el tiempo de cero (0) horas, en comparación al obtenido en el tiempo de cuatro (4) horas; presenta una variación de 17 Kg. También se observa que a medida que aumenta el valor del RICE el Porcentaje de Asfalto Absorbido será mayor, lo que afectará en cierta proporción el diseño de la mezcla.

4.4.2 Ensayo MARSHALL para las Mezclas Curadas (4 horas)

4.4.2.1 Ensayo MARSHALL con Agregados de Cantera de la Mezcla Curada.

Tabla 44: Resultados del Ensayo MARSHALL de la Mezcla Curada para agregado de Cantera.

%CA	LAS MARIAS - PROPIEDADES MARSHALL DE LA MAC										
	ESTABILIDAD			Peso Aire	Peso Sumergido	PSSS	VOLUMEN	DENSIDAD	FLUJO	D.E	%CV
		D.E	%CV								
5,24	4496	51,92	1	1191,7	684,8	1195,2	510,4	2,332	10	0	0
	4406			1190,3	685,4	1195,6	510,2	2,333	10		
	4496			1192	685,5	1197	511,5	2,33	10		
	4466	Según ASTM: %CV = 6							2,332	10	Según ASTM: %CV = 9

RICE Y VACIOS DE LA MAC			
RICE	VT	VAM	VLL
2,526	7,7	16,0	51,9

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Tabla 45: Propiedades MARSHALL comparadas con el criterio de la Norma INVEAS (aprobada por FONDONORMA), Briqueta Curada con un Contenido Óptimo de Asfalto de 5,24%

Propiedades MARSHALL	Unidad de Medición	Valor Obtenido	Criterio según Norma	Cumple
<i>Densidad</i>	g/cm ³	2,332	Ninguno	Sí
<i>Estabilidad</i>	lbs	4466	mínimo 2200	Sí
<i>Flujo</i>	0,001 pulg	10	8-14	Sí
<i>Vv</i>	%	7,7	3-5	No
<i>VAM</i>	%	16	14,9	No
<i>VII</i>	%	51,9	65-75	No

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

4.4.2.2 Ensayo MARSHALL para agregados de Mina de la Mezcla Curada

Tabla 46: Resultados Ensayo Marshall de la Mezcla Curada para agregado de Mina.

%CA	CASCABEL - PROPIEDADES MARSHALL DE LA MAC										
	ESTABILIDAD			Peso Aire	Peso Sumergido	PSSS	VOLUMEN	DENSIDAD	FLUJO	D.E	%CV
		D.E	%CV								
6,04	3414	164,7	5	1188,4	678,4	1195,3	516,9	2,299	9	0,577	5,973
	3367			1185,3	675,3	1192,1	516,8	2,294	10		
	3108			1214,9	700,8	1228,2	527,4	2,296	10		
	3296	Según ASTM: %CV = 6						2,296	10	Según ASTM: %CV = 9	

RICE Y VACIOS DE LA MAC			
RICE	VT	VAM	VLL
2,553	10,1	18,5	45,8

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Tabla 47: Propiedades MARSHALL comparadas con el criterio de la Norma INVEAS (aprobada por FONDONORMA), Briqueta Curada con un contenido óptimo de asfalto de 6,04%

Propiedades MARSHALL	Unidad de Medición	Valor Obtenido	Criterio según Norma	Cumple
Densidad	g/cm3	2,296	Ninguno	Sí
Estabilidad	lbs	3297	mínimo 2200	Sí
Flujo	0,001 pulg	10	8-14	Sí
Vv	%	10,1	3-5	No
VAM	%	18,5	13,4	No
Vll	%	45,8	65-75	No

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Al comparar los resultados obtenidos del ensayo MARSHALL se refleja como los diversos Porcentajes de Vacíos (V_v , VAM y V_{ll}), tanto para el Agregado proveniente de Cantera “Las Marías” como el Agregado “Las Minas de Cascabel”, no cumple con el rango

de valores establecido por la Norma Venezolana. Comparando los resultados obtenidos en las propiedades Marshall de las mezclas curadas y no curadas:

Tabla 48: Comparación de las propiedades MARSHALL de la mezcla curada con la mezcla no curada

Propiedades MARSHALL	Unidad de Medición	Cantera "LAS MARÍAS"		"LAS MINAS DE CASCABEL"	
		Mezcla No Curada	Mezcla Curada	Mezcla No Curada	Mezcla Curada
Densidad	g/cm ³	2,375	2,332	2,451	2,296
Estabilidad	lbs	3022	4466	3274	3296
Flujo	0,001 pulg	10	10	12	10
Vv	%	4,9	7,7	3,4	10,1
VAM	%	14,4	16	13,1	18,5
VII	%	66,2	51,9	74,3	45,8

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Estudiando las propiedades MARSHALL y los valores obtenidos de los vacíos de ambos agregados se puede observar como el valor obtenido de la Densidad, de una muestra Curada en comparación con una muestra No Curada, disminuye a medida que aumenta el tiempo. El valor de contenido de vacíos, de la mezcla Curada en comparación con la No Curada, aumenta; esto demuestra la gran importancia que tiene incluir el tiempo de curado en el ensayo RICE.

Los agregados utilizados para la elaboración de la MAC presentan cierta porosidad por lo que tienden a absorber en mayor o menor proporción el cemento asfáltico; a medida que aumenta el tiempo de curado esa proporción, como se observa en los resultados obtenidos, va a ir aumentando lo que genera en la mezcla un aumento en el contenido de vacíos (Vv, VAM) y esto a su vez genera una disminución de la densidad.

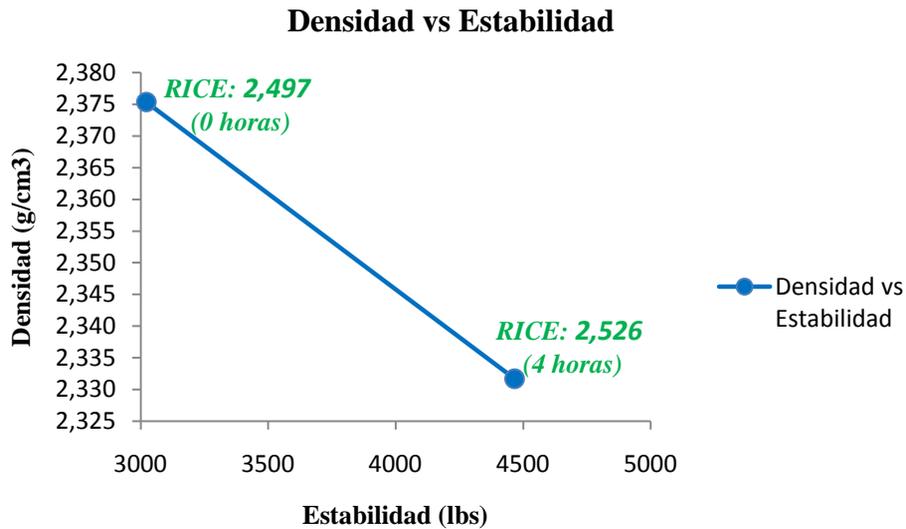


Gráfico 8: Relación de la Densidad de los Agregados provenientes de Cantera “Las Marías”

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

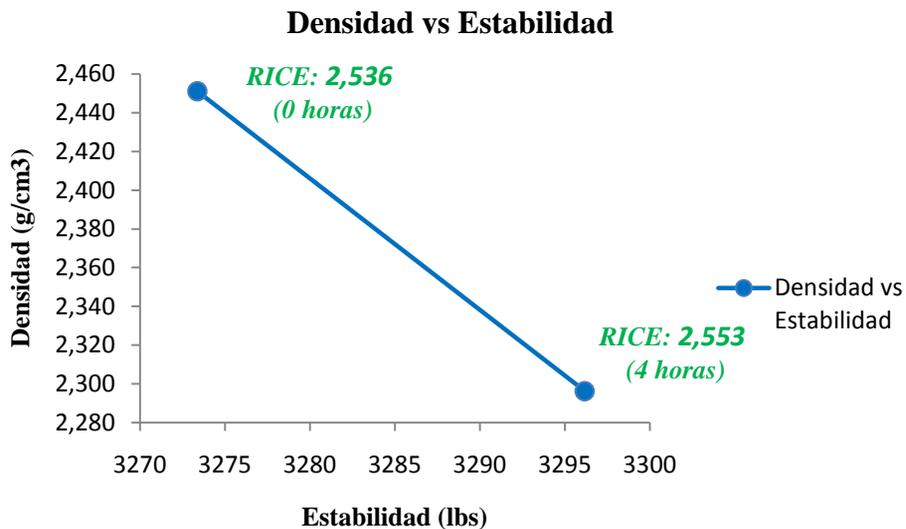


Gráfico 9: Relación de la Densidad de los Agregados provenientes de “Minas de Cascabel”

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

Se observa claramente en los resultados obtenidos, tanto para el agregado proveniente de cantera como para el agregado proveniente de mina, que a medida que disminuye el valor de la Densidad aumenta la Estabilidad, esto es producto de que cuando la mezcla es curada a medida que aumenta el tiempo de curado la mezcla se vuelve más seca.

La tabla siguiente presenta una proyección del porcentaje de vacíos totales en campos, calculado con el 97% del valor de la densidad obtenida en laboratorio.

Tabla 49: Resumen Porcentajes de vacíos totales en campo

	97% DL	RICE	% Vacíos de Aire	Tiempo Curado (horas)
Canteras las Marías	2,304	2,497	7,7	0
	2,262	2,526	10,5	4
Minas de Cascabel	2,377	2,536	6,26	0
	2,227	2,553	12,77	4

Fuente: Cheng y Sanz

RICE SIN CURAR Y CURADO VS VACÍOS TOTALES EN CAMPO

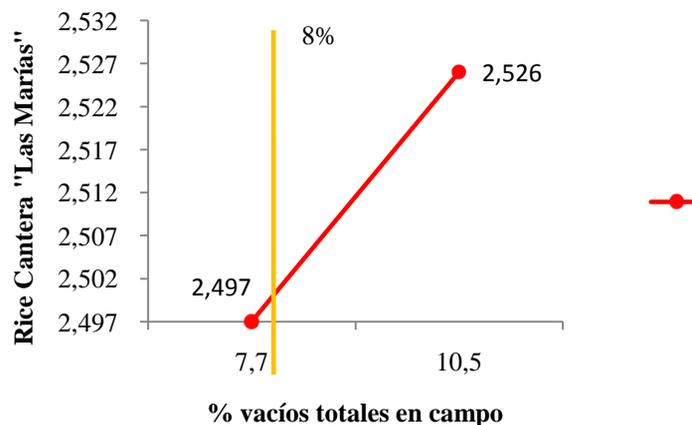


Gráfico 10: Variación RICE curado y sin curar con el 97% de vacíos totales en campo de los Agregados provenientes de Cantera "Las Marías"

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

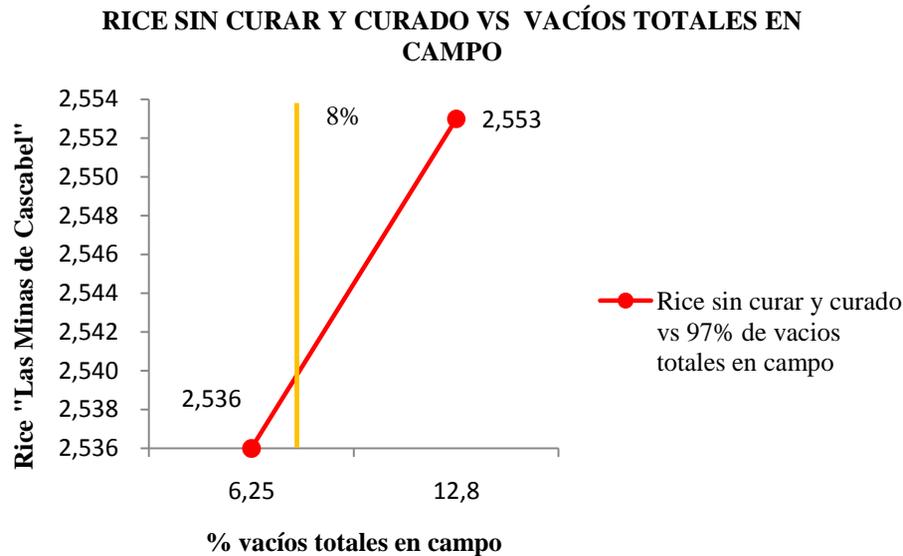


Gráfico 11: Variación RICE curado y sin curar con el 97% de vacíos totales en campo de los Agregados provenientes de “Las Minas de Cascabel”

Fuente: Cheng y Sanz (2013)

En los gráficos anteriores se presenta el notable aumento del porcentaje de vacíos totales en campo; de los agregados provenientes de Cantera el porcentaje de vacíos de mezcla no curada es de 7,7% mientras que el porcentaje de la mezcla curada es de 10,5%; los agregados de Mina presentan un aumento de 6,25% (mezcla no curada) a 12,8% (mezcla curada).

En la mezcla curada (para ambos agregados) el porcentaje de vacíos totales en campo supera considerablemente el valor de 8% de vacíos totales en campo, siendo éste valor el máximo permitido por la IDA (1992) para evitar la permeabilidad en la mezcla compactada.

Es evidente que existe una influencia muy importante del tiempo de curado para el diseño de la MAC, este aumento del porcentaje de vacíos totales de campo aumentaría la permeabilidad lo que generaría una fractura prematura en la MAC.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

1. Se determina que la Densidad Máxima Teórica, porcentaje de vacíos totales y porcentaje de asfalto absorbido; presentan un incremento a medida que va aumentando el tiempo de curado.
2. Los porcentajes de vacíos totales o de aire aumentan, a medida que se incrementa el curado de la MAC, lo que genera una disminución de la densidad, ocasionando vacíos muy por encima de los rangos permitidos. y por ende afectando los de campo. Para la mezcla no curada (0 horas) resulta un porcentaje de vacíos totales de campo menor al valor máximo recomendado por el IDA que es 8%; y para la curada se registraron porcentajes de vacíos totales de campo mayor a 8%, lo que trae como consecuencia un aumento de la permeabilidad.
3. La tendencia de la estabilidad es que se incremente de forma tal que presenta una condición aparente de rigidez, se presume, que es producto de la ausencia de asfalto en la mezcla, luego de pasar 4 horas de curado. Condición que genera fallas prematuras en la misma.
4. A pesar de que el Ensayo normalizado MARSHALL contempla un mínimo de 1h y un máximo de 2h de curado se demostró que la absorción de asfalto en los agregados de la mezcla continúa a mayor tiempo, obteniéndose valores de RICE diferentes para cada tiempo de registrado.

CAPITULO VI

RECOMENDACIONES

- Bajo los resultados presentados se sugiere para el diseño de la MAC incluir en la metodología del RICE el tiempo de curado, con el fin de obtener resultados de Porcentaje Óptimo de Asfalto que se acerquen más a las condiciones reales de campo, evitando así que los vacíos de aire se registren por encima del permitido (8%).

- Se sugiere bajo el esquema de la línea de investigación, realizar un estudio más amplio que involucre más tipos de agregados provenientes de diferentes sitios del país con el propósito de realizar comparaciones sobre la absorción de asfalto que pueda ocurrir durante el transporte de la mezcla y como éste podría afectar la calidad de la misma.

- Se recomienda realizar otros trabajos de investigación donde se incluya el Ensayo de Resistencia Retenida.

- En ASTM internacional D6926-10 señala que la temperatura de curado sea “a una temperatura de 15° F (8 °C) a 20 °F (11 °C) por encima la temperatura de compactación”. Es oportuno indicar que esa temperatura, dependerá de los resultados del “Patrón de Compactación”, valor de temperatura que no permitiría un asfalto fluido, de forma tal que sea posible la interrelación con los poros del agregado. Por lo antes dicho, se presenta en esta investigación, considerar que en Venezuela la temperatura de curado sea la que se utiliza para su fabricación.

- Informar y realizar jornadas de capacitación a todo personal involucrado, en especial a los operadores de laboratorio, para actualizarlos, debido a que se observó que desconocen las recientes actualizaciones.

- Calibrar periódicamente la instrumentación y equipos a utilizar, en el laboratorio de mezclas, con el fin de obtener resultados más confiables.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARIAS, F. (2006) **EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**. (5ª ed.). Caracas: Episteme.
- ASTM D2041/D2041M – 11 “*Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*”
- ASTM D6926 – 10 “*Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall Apparatus*”
- ASTM D6927-05^{e1} “*Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures*”
- CORREDOR, G. (2011). **APUNTES DE PAVIMENTOS** Volumen II. Caracas: Universidad Católica Andrés Bello // USM.
- HERNÁNDEZ, R.; FERNÁNDEZ, C. Y BAPTISTA, P. (1999). *Metodología de la Investigación*. (2ª ed.). México: Mc Graw Hill.
- Instituto Americano del Asfalto (IDA). “*Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Manual MS-22*”. (1992) Edición en español. Estados Unidos.
- “*Norma del Instituto Venezolano del Asfalto*”(2004), aprobada por FONDONORMA. Instituto Venezolano del Asfalto.
- Rivas, S; Padilla, C., 2008. **Aplicación de los distintos Cementos Asfálticos producidos por PDVSA y utilizados para pavimentación en Venezuela**. Obtenido el 06 de Mayo de 2013 en http://www.inveas.org.ve/data/documentos_inveas/boletines/T03.%20Rivas%20y%20Padilla.%20Aplicaciones%20C.A.%20Pdvs%20para%20pavimenta.pdf
- SABINO, C. (2000). **EL PROCESO DE INVESTIGACIÓN**. Caracas: Panapo. 4ª edición.
- TAMAYO Y TAMAYO, M. (2008). **LA INVESTIGACIÓN**. Serie Aprender a Investigar. Módulo 2. Santa Fe de Bogotá: Instituto Colombiano para el Fomento de la Educación Superior. 5ª revisión.
- YUNÌ, J.; URBANO C. (2006). *Técnica para Investigar y formular proyectos de investigación*. (2ª ed.). Argentina: Brujas.

ANEXOS

ANEXO A: GLOSARIO

Agregado fino: Fracción que pasa el tamiz # 8 y queda retenida en el N° 200

Agregado grueso: Fracciones retenidas en el tamiz #8

Arizada: Conjunto de formaciones que permite trazar gráficamente los lugares geométricos de los conceptos de vacío dentro del marco de densidad MARSHALL y contenido de asfalto.

Cernido: separación de cualquier material a través de un cedazo, separando las partes más finas de las gruesas.

Coagulación: Solidificación de los líquidos.

Coalescencia: Es la **propiedad** de las cosas de **fundirse** o **unirse**.

Erosión: Desgaste que se produce en la superficie de un cuerpo por la acción de agentes externos (como viento o el agua) o por la fricción continua de otros cuerpos.

Geomateriales: Cualquier material de construcción con al menos tres fases: sólidos (aportados por los materiales térreos y materia prima de cualquier geomaterial), aire (cantidad de vacíos) y líquido (agua, líquido asfáltico, pasta/cemento u otro).

Oxidación del asfalto: Es una reacción entre el asfalto y el oxígeno, es una forma de polimeración (formación de moléculas más grandes que genera una estructura rígida).

Tamiz: Herramienta para calcular el tamaño de las partículas de un suelo

Tiempo de Curado: Tiempo en que la mezcla es colocada en el horno a una temperatura constante.

ANEXO B: SIGLAS

AASHTO: Asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y Transporte.

ASCE: Sociedad Americana De Ingenieros Civiles.

ASTM: American SocietyforTesting and Materials, o Sociedad Americana de Ensayos y Materiales.

CA: Cemento Asfáltico.

COVENIN:Comisión Venezolana de Normas Industriales.

FONDONORMA: Fondo para la Normalización y Certificación de la Calidad

IDA: Instituto Americano de Asfalto.

INVEAS: Instituto Venezolano del Asfalto.

Gb:Densidad del Asfalto a 25°C.

Gs:Gravedad Específica.

Gsa:Gravedad Específica Aparente.

Gsb:Gravedad Específica Bulk.

Gse: Gravedad Específica Efectiva.

Gmb:Densidad Máxima Teórica MARSHALL.

Gmm: Densidad Máxima Teórica RICE.

MAC: Mezcla Asfáltica en Caliente.

MC: Curado Medio.

MCAC: Mezclas de Concreto Asfáltico en Caliente.

PAV: Cámara de Envejecimiento a Presión.

Pb: Peso del ligante de la mezcla total.

PE: Peso Específico.

Pmm: Peso Total de la briqueta.

Ps: Peso del agregado en la mezcla total.

RAMCODES®: Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Materiales Compactados.

RC: Curado Rápido.

RTFO: Ensayo de Película Delgada en Horno Rotatorio.

SUPERPAVE®: Superior Performing Asphalt Pavements o Pavimentos Asfálticos de Desempeño Superior.

TFOT: Ensayo en Estufa de Película Delgada.

TFROT: Ensayo de Estufa de Película Delgada Rodante.

TM: Tamaño Máximo.

TNM: Tamaño Nominal Máximo.

VAM: Vacíos del agregado mineral.

V_{II}: Vacíos llenados con asfaltos

V_t, V_v: Vacíos totales o vacíos de aire.

ANEXO C: Factores de corrección de la estabilidad leída en briquetas elaboradas siguiendo el Método MARSHALL de diseño de mezclas.

Volumen de la briketa (cm ³)	Altura aproximada de la briketa		Factor multiplicador de la "estabilidad leída"
	mm	pulgadas	
368 a 379	46.0	1 13/16	1.79
380 a 392	47.6	1 7/8	1.67
393 a 405	49.2	1 15/16	1.56
406 a 420	50.8	2	1.47
421 a 431	52.4	2 1/16	1.39
432 a 443	54.0	2 1/8	1.32
444 a 456	55.6	2 3/16	1.25
457 a 470	57.2	2 ¼	1.19
471 a 482	58.7	2 5/16	1.14
483 a 495	60.3	2 3/8	1.09
496 a 508	61.9	2 7/16	1.04
509 a 522	63.5	2 ½	1.00
523 a 535	64.0	2 9/16	0.96
536 a 546	65.1	2 5/8	0.93
547 a 559	66.7	2 11/16	0.89
560 a 573	68.3	2 ¾	0.86
574 a 585	71.4	2 13/16	0.83
586 a 598	73.0	2 7/8	0.81
599 a 610	74.6	2 15/16	0.78
611 a 625	76.2	3	0.76

ANEXO D: MEMORIA FOTOGRAFICA

Granulometría de los agregados y Peso Especifico



Tamizadora Eléctrica Agregado Grueso Tamizadora Eléctrica Agregado Fino



Agregados sumergidos por 24 horas para Peso Especifico



Lavado del Agregado Grueso



Secado del Agregado Grueso



Pasante 200 para Peso Especifico



Ensayo de Peso Especifico



Medición de Temperatura



Agregado Saturado con Superficie Seca

Ensayo RICE



Pesadas para el Ensayo RICE



Pesaje del Cemento Asfáltico



Mezclado del CA con el Agregado



Separación de la MAC



Tamizado de la MAC



Picnómetro de Vacíos



Medición de Peso



Simulador dentro del Horno



Medición de temperatura a la MAC

Ensayo MARSHALL



Placa de Calentamiento



Medición de la temperatura de Compactación



Martillo de Compactación



Extracción de Briqueta



Briquetas



Briquetas Sumergidas a 60°C



Prensa MARSHALL y Fluxómetro

ANEXO E: NORMAS ASTM