



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**EVALUACIÓN DE LAS
PROPIEDADES MARSHALL DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE
DISEÑADAS CON AGREGADO PÉTRICO
Y MATERIAL PRODUCTO DEL
ESCARIFICADO DE CARPETAS
ASFÁLTICAS CON PORCENTAJES DE
PARTICIPACIÓN SUPERIOR AL 30%
DEL PESO TOTAL DEL AGREGADO**

Autores: Carrasco Luis
C.I.: V-22.271.385
Rojas Víctor
C.I.: V-23.435.579

Urb. Yuma II, Calle N° 3, Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (Master) - Fax: (0241) 871239



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MARSHALL DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS EN CALIENTE DISEÑADAS CON AGREGADO PÉTREO
Y MATERIAL PRODUCTO DEL ESCARIFICADO DE CARPETAS
ASFÁLTICAS CON PORCENTAJES DE PARTICIPACIÓN SUPERIOR
AL 30% DEL PESO TOTAL DEL AGREGADO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO CIVIL**

Autores: Carrasco Luis

C.I.: V-22.271.385

Rojas Víctor

C.I.: V-23.435.579

Tutor: Ing. Castillo Antonio

San Diego, Noviembre 2015



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
CARRERA INGENIERÍA CIVIL

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Antonio Castillo portador de la cédula de identidad N° 12.020.569, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por los ciudadanos Luis Carrasco y Víctor Rojas, portadores de la cédula de identidad N°22.271.385 y N°23.435.579, respectivamente, titulado **EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MARSHALL DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DISEÑADAS CON AGREGADO PÉTREO Y MATERIAL PRODUCTO DEL ESCARIFICADO DE CARPETAS ASFÁLTICAS CON PORCENTAJES DE PARTICIPACIÓN SUPERIOR AL 30% DEL PESO TOTAL DEL AGREGADO** presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 7 días del mes de Noviembre del año dos mil quince.

Ing. Antonio Castillo.
C.I.: V-12.020.56

ÍNDICE

Contenido	Pág.
INDICE DE TABLAS	VIII
RESUMEN	IX
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO	
I EL PROBLEMA	
1.1 Planteamiento del Problema.....	4
1.2 Formulación del Problema.....	6
1.3 Objetivos de la Investigación.....	6
1.3.1 Objetivo General.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6
1.4 Justificación.....	7
II MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes.....	9
2.2 Bases Teóricas.....	13
2.2.1 Cemento asfáltico.....	14
2.2.2 Especificaciones de calidad para el asfalto.....	16
2.2.3 Composición del asfalto.....	16
2.2.3.1 Propiedades químicas del asfalto.....	16
2.2.3.2 Propiedades físicas del asfalto.....	17
Durabilidad.....	18
Endurecimiento y envejecimiento.....	18
Adhesión y cohesión.....	20
Susceptibilidad a la temperatura.....	20
Pureza.....	20
Gravedad específica.....	21
2.2.4 Materiales pétreos para carpetas asfálticas.....	21
2.2.5 Propiedades principales de los agregados.....	21
Granulometría.....	21
Tamaño máximo.....	22
Peso unitario.....	22
Peso específico.....	22
Humedad y absorción.....	22
Segregación.....	23
Impurezas.....	23
Resistencia de los agregados.....	24
Forma de partículas y textura superficial.....	25
2.2.6 Método Marshall.....	26
2.2.7 Propiedades Marshall.....	28

	Densidad.....	28
	Vacíos de Aire.....	28
	Vacíos en el Agregado Mineral (VAM).....	29
	Contenido de asfalto.....	29
	2.2.8 Reciclaje de Pavimentos.....	30
	2.2.9 Material Asfáltico Reciclable (MAR).....	31
	2.2.10 Tipos de Reciclaje de Pavimentos.....	34
	2.2.11 Escarificación de mezclas asfálticas.....	35
	2.2.12 Diseño de mezclas asfálticas con incorporación de material producto del escarificado.....	35
	2.3 Definición de Términos.....	37
III	MARCO METODOLÓGICO	
	3.1 Tipo de Investigación.....	39
	3.2 Nivel de la Investigación.....	39
	3.3 Diseño de la Investigación.....	39
	3.4 Población y Muestra.....	40
	3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	40
	3.6 Fases Metodológicas.....	40
IV	ANÁLISIS DE RESULTADOS	
	4.1 Caracterizar el material escarificado.....	44
	4.1.1 Granulometría en estado original y después de la Extracción.....	45
	4.1.2 Extracción de ligante asfáltico.....	45
	4.2 Determinar propiedades del cemento asfáltico.....	46
	4.2.1 Penetración.....	46
	4.2.2 Peso específico.....	47
	4.2.3 Punto de ablandamiento.....	48
	4.2.4 Viscosidad absoluta.....	48
	4.2.5 Ductilidad.....	49
	4.2.6 Durabilidad.....	49
	4.2.7 Punto de ablandamiento.....	50
	4.3 Definir características del agregado pétreo.....	50
	4.4 Diseñar mezclas asfálticas con incorporación de material producto de a escarificación mayor al 30% del peso del agregado.....	55
	4.4.1 Densidad de las briquetas.....	61
	4.4.2 Estabilidad y flujo.....	62
	4.4.3 Análisis de densidad y vacíos.....	64
	4.4.3.1 Peso específico del material combinado.....	64
	4.4.3.2 Gravedad específica máxima de la mezcla.....	65
	4.4.3.3 Gravedad específica máxima teorica	66

4.4.3.4 Vacíos totales de la mezcla.....	67
4.4.4 Curvas de diseño.....	67
4.5 Evaluar las propiedades Marshall de la mezcla diseñada con la incorporación de material producto de la escarificación con 35% del peso total del agregado.....	70
V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

LISTA DE TABLAS

CONTENIDO

TABLA

1	Granulometría promedio de la Mezcla Asfáltica Recuperada en estado original y después de la extracción.....	45
2	Penetración Original a 25°C.....	47
3	Peso Específico a 25°C.....	47
4	Punto de Ablandamiento.....	48
5	Viscosidad Absoluta.....	49
6	Ductilidad Original.....	49
7	Envejecimiento por capa fina (TFOT).....	50
8	Punto de Inflamación.....	50
9	Granulometría de los agregados. Porcentaje pasante.....	51
10	Pesos específicos de la fracción gruesa de los agregados.....	51
11	Pesos específicos del pasante del tamiz #8 y retenido en #200..	51
12	Peso específico de la fracción que pasa el tamiz #200.....	52
13	Caras Fracturadas.....	52
14	Partículas planas y alargadas.....	53
15	Desgaste de los Ángeles Piedra < 3/4”.....	54
16	Resumen de características del agregado.....	54
17	Combinación de diseño. Mezcla tipo M-12.....	55
18	Peso del agregado para cada briqueta en función del contenido de Cemento Asfáltico.....	56
19	Peso retenido en tamices de la Arena Lavada para cada porcentaje de Cemento Asfáltico.....	57
20	Peso retenido en tamices del Arrocillo-Polvillo para cada porcentaje de Cemento Asfáltico.....	57
21	Peso retenido en tamices de la Piedra picada < 3/4” en función del Cemento Asfáltico.....	58
22	Peso retenido en tamices del M.A.R. para cada porcentaje de Cemento Asfáltico.....	58
23	Propiedades Marshall de la mezcla con porcentaje óptimo de Cemento Asfáltico.....	71

LISTA DE FIGURAS

CONTENIDO

FIGURA

1	Picas de máquina escarificadora (fresadora).....	44
2	Colocación de xilol en la máquina centrifugadora.....	46
3	Centrifugadora.....	46
4	Ligante asfáltico extraído del agregado.....	46
5	Pesada de agregados para la combinación con 3% de Cemento Asfáltico.....	60
6	Pesadas en el horno (160°C).....	60
7	Agregados antes de mezclarse con el cemento asfáltico.....	61
8	Agregados después de haberse mezclado a temperatura previa de compactación.....	61
9	Martillo Marshall.....	62
10	Extracción de la briqueta del molde.....	63
11	Pesada de briqueta seca.....	63
12	Pesada de briqueta sumergida.....	63
13	Briquetas sumergidas en agua.....	63
14	“Baño de agua María”.....	63
15	Rotura de las briquetas.....	64
16	Ensayo Rice.....	67

LISTA DE GRÁFICOS

CONTENIDO

GRÁFICOS

1	Peso unitario Vs. Porcentaje Cemento Asfáltico.....	69
2	Vacíos totales Vs. Porcentaje Cemento Asfaltico.....	69
3	Vacíos Agregado Mineral Vs. Porcentaje Cemento Asfaltico.....	70
4	Estabilidad (Lbs) Vs. Porcentaje Cemento Asfaltico.....	70
5	Flujo Vs. Porcentaje Cemento Asfaltico.....	71

LISTA DE ANEXOS

CONTENIDO

ANEXOS

A	Caracterización del Material Asfáltico Reciclado (MAR).....	79
A-1	Peso específico Material Asfáltico Reciclado, (Retenido en el tamiz #8).....	80
A-2	Peso específico Material Asfáltico Reciclado (Pasante tamiz #8 – retenido en el tamiz #200).....	81
A-3	Peso específico Material Asfáltico Reciclado.....	82
B	Caracterización de agregado pétreo.....	83
B-1	Peso específico arrocillo-polvillo (Retenido en el tamiz #8).....	84
B-2	Peso específico arrocillo-polvillo (Pasante tamiz #8 – retenido en el tamiz #200).....	85
B-3	Peso específico arrocillo-polvillo (Pasante tamiz #200).....	86
B-4	Peso específico piedra picada (Retenido en el tamiz #8).....	87
B-5	Peso específico arena (Retenido en el tamiz #8).....	88
B-6	Peso específico arena (Pasante tamiz #8 – retenido en el tamiz #200).....	89
B-7	Peso específico arena (Pasante tamiz #200).....	90
B-8	Granulometría arrocillo-polvillo.....	91
B-9	Granulometría piedra picada < 3/4 ''.....	92
B-10	Granulometría arena.....	93
B-11	Anexo B-10. Equivalente de Arena.....	93
C	Diseño de la mezcla asfáltica con incorporación de material producto de la escarificación.....	94
C-1	Combinación de agregados en frío.....	95
C-2	Curva granulométrica de los agregados en frío.....	96
C-3	Peso de agregado por briqueta en función del C.A (1200gr)...	97
C-4	Peso de arena por briqueta en función del C.A, y granulometría. (1200gr.).....	98
C-5	Peso de arrocillo-polvillo por briqueta en función del C.A, y granulometría. (1200gr.).....	99
C-6	Peso de piedra picada por briqueta en función del C.A, y granulometría. (1200gr.).....	100
C-7	Peso de Material Asfáltico Reciclado (MAR) por briqueta en función del C.A, y granulometría. (1200gr.).....	101

C-8	Granulometría después de la extracción.....	102
C-9	Curva granulométrica después de la extracción.....	103
D		
	Evaluación de las propiedades Marshall de la mezcla asfáltica diseñada.....	104
	Propiedades Marshall empleando 2,5% de C.A.....	105
D-1	Propiedades Marshall empleando 3,0% de C.A.....	106
D-2	Propiedades Marshall empleando 3,5% de C.A.....	107
D-3	Propiedades Marshall empleando 4,0% de C.A.....	108
D-4	Propiedades Marshall empleando 4,5% de C.A.....	109
D-5	Propiedades Marshall empleando 5,0% de C.A.....	110
D-6	Propiedades Marshall empleando 5,5% de C.A.....	111
D-7	Peso específico de los agregados combinados.....	112
D-8	Pesos específicos de los agregados.....	113
D-9	Peso específico aparente.....	114
D-10	Resumen de resultados.....	115
D-11	Gravedad específica máxima de la mezcla sin compactar (Gmm)..	116
D-12	Análisis comparativos de resultados.....	117
D-13	Extracción de cemento asfáltico.....	118
D-14	Anexo D-15. Tamaño de partículas.....	119



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
CARRERA INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MARSHALL DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS EN CALIENTE DISEÑADAS CON AGREGADO PÉTREO
Y MATERIAL PRODUCTO DEL ESCARIFICADO DE CARPETAS
ASFÁLTICAS CON PORCENTAJES DE PARTICIPACIÓN SUPERIOR
AL 30% DEL PESO TOTAL DEL AGREGADO**

Autores: Carrasco Luis, Rojas Víctor

Tutor: Ing. Antonio Castillo

Fecha: Junio, 2015

RESUMEN

En el presente trabajo se busca diseñar una mezcla asfáltica en caliente incorporando material producto del escarificado de carpetas asfálticas con porcentajes de participación superiores al treinta por ciento del peso total del agregado como lo estipula Fondonorma (NTF 2000-1:2009) y evaluar sus propiedades Marshall con el fin de corroborar si esta nuevas mezclas cumplen con las propiedades físicas y mecánicas óptimas para un diseño adecuado de mezcla asfáltica, buscando ampliar el rango de reciclaje que estipula la norma el cual es de 30% con la expectativa de reducir el impacto ambiental que origina la extracción indiscriminada de materiales pétreos.

Descriptores: Mezcla asfáltica reciclada, material escarificado, propiedades Marshall.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería en vialidades, es una de las más importantes ramas de la ingeniería civil, pues cubre una necesidad tremenda a lo largo del país. La vialidad es un pilar fundamental para el crecimiento de las actividades económicas de una nación. Tanto así, que muchos autores importantes especialistas en el área, han destacado que el desarrollo de un país puede ser medido en función de la calidad y cantidad de vías que este posea.

Sin embargo, esta industria no escapa de ser un agente importante en un problema que hoy en día, se ha convertido en un llamado de atención global para todos los que habitan la tierra y forman parte de una civilización que cada día busca crecer, y mejorar su calidad de vida. Se habla del impacto ambiental, y en esta industria, así como en general, en la industria de la construcción, es inevitable, pues la utilización de materiales para emprender los distintos proyectos de ingeniería es indispensable.

Una de las áreas que debido a su más empírico diseño y concepto funcional, ocasiona gran impacto, es la industria de la construcción de carreteras, pues en el desarrollo de este proceso, es indispensable el uso de agregados o piedras, como también se le suele conocer para un óptimo diseño. La extracción de esta requiere un largo proceso que involucraría la extracción del material en una cantera, o posiblemente de alguna ladera de río, que a primeras estancias no es percibido, pero con el pasar de los años, la desmedida extracción puede ocasionar cambios significativos en el ecosistema circundante al área de extracción, poniendo en riesgo fauna y flora silvestre y en ciertas ocasiones estas alteraciones cambian el ciclo natural de vida, como diferentes aspectos hidrológicos, específicamente si tomamos como ejemplo algún río.

Es por esto, que atendiendo a la tendencia de las nuevas tecnologías y el avance en la capacidad de resolución de problemas en el hombre moderno, que busca mantener

un equilibrio consciente con el medio ambiente, empiezan a surgir nuevas propuestas que reduzcan significativamente el impacto ambiental.

El reciclaje, ha sido una gran alternativa que muchas veces forma parte del concepto en estas propuestas. Y en la industria de la construcción de carreteras, ya hay una pequeña trayectoria del tema, en la que se ha buscado reemplazar materiales convencionales de extracción, por materiales que han cumplido alguna función y son considerados un desecho, entonces se busca reutilizarlos con la finalidad de aprovechar aún más sus propiedades.

Uno de estos materiales es el fresado, aquel material residuo tras haber realizado la rehabilitación, o desmantelamiento de una carretera. Este material, tras haber realizado el desmantelamiento de la carretera, suele desperdiciarse, dejándose abandonado en algún lugar o es empleado para acomodo de vías informales, sin adecuados procesos de construcción, desaprovechando sus propiedades aún disponibles aunque el diseño de la carretera a la que perteneció haya caducado.

En el presente trabajo de investigación, los autores en consideración a esta problemática global, realizarán un estudio que les permita determinar diferentes propiedades que atienden a un comportamiento adecuado para el diseño de una nueva mezcla que contenga material reciclado y permita dar unas conclusiones y recomendaciones al respecto, en discusión con la normativa venezolana vigente.

Para poder dar estas conclusiones, se ha estructurado la investigación de la siguiente forma:

Capítulo I. El problema: Hace referencia de forma al planteamiento de la problemática que será estudiada, y se especificaran los objetivos que se esperan alcanzar, así como también la justificación al problema, el alcance, el proyecto y sus limitaciones.

Capítulo II. Marco Teórico: Hará referencia a los fundamentos teóricos, terminología aplicada fundamental, y antecedentes estrechamente relacionados que sustenten científicamente la presente investigación.

Capítulo III. Marco Teórico: Se describirán los diferentes procesos metódicos que se deben cumplir para el cumplimiento de los objetivos planteados. Así como también, se describirá la metodología de análisis, recolección e interpretación de los resultados obtenidos durante el proceso investigativo.

Capítulo IV. Análisis de Resultados: Se plasmaran los resultados obtenidos y se realizará el respectivo análisis de los procesos necesarios que deben realizar los investigadores, y de esta forma permitan realizar satisfactoriamente su investigación tomando en cuenta una secuencia lógica.

Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones: Pondrá en evidencia los resultados obtenidos y se hará referencia a los mismos ofreciendo un análisis técnico.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1.Planteamiento del problema

El deseo del ser humano, desde el principio de su existencia, de mantenerse comunicado, lo ha impulsado a abrir brechas y a desarrollar diversos métodos y técnicas para la adecuada construcción de los caminos, observándose a través de la historia algunos de piedras y aglomerantes, que se han ido perfeccionando progresivamente, hasta llegar al presente, en que se hacen autopistas con pavimento rígido y flexible proporcionando mayor seguridad y consistencia.

Entendiéndose como pavimento aquel elemento multicapa de material seleccionado, que recibe en forma directa las cargas del tránsito vehicular, compuesto por al menos tres elementos como lo son: la carpeta de rodamiento, la base y el suelo de fundación. Los dos primeros elementos finitos y el último de ellos infinito. Dicho en otras palabras, es una superficie de rodamiento formada por una franja, la cual debe contar con las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento y, dependiendo del tipo de pavimento puede ser de asfalto o de concreto hidráulico; de modo entonces, que al hablar de diseños de mezclas asfálticas se puede decir que, específicamente, una mezcla de pavimento asfáltico en caliente, es una mezcla uniforme y controlada de cemento asfáltico y agregado caliente.

En referencia, Corredor (2006) dice, que es aquel proceso donde se determina una combinación de tipos de materiales y espesores de capas construidas con tales materiales, que logren garantizar el comportamiento estructural de su conjunto cuando es sometido a los

efectos impuestos por las variables actuantes sobre esta estructura, así como también para los cuales ha sido diseñado.

En Venezuela, los pavimentos asfálticos son los más utilizados para la elaboración de vías, tal y como lo explica Corredor (ob.cit) reseñando, que “en el país de los 29.991,30 km pavimentados, un 99,80% de ellos corresponden a este tipo” (p. 1-19). Esto se debe principalmente a la gran cantidad de yacimientos petroleros en el país, de donde se obtiene el cemento asfáltico utilizado para dichas mezclas.

Ahora bien, los pavimentos asfálticos se diseñan, estimando un tiempo de vida útil del mismo, el cual con un adecuado mantenimiento, logra contrarrestar los efectos -del paso vehicular y las acciones ambientales, entre otros factores que intervienen en el envejecimiento y deterioro de los materiales que componen la estructura del pavimento en cuestión.

Sin embargo, en Venezuela no se le presta el mantenimiento necesario a las vías en la mayoría de los casos y como consecuencia se evidencian deterioros tempranos dando paso a una posterior rehabilitación o completa sustitución de la carpeta asfáltica, según la Martec Recycling Corporation (2009). Debido a ello, gran cantidad de recursos naturales no renovables son destinados a la elaboración, rehabilitación y sustitución de carpetas asfálticas dejando una huella ecológica importante en el ambiente.

En la actualidad, se sabe que el material proveniente del escarificado de carpetas asfálticas, tiene gran potencial para ser reciclado al ser incorporado a nuevas mezclas; de hecho, en Estados Unidos, el 94% de las vías son pavimentadas con asfalto, del 80% de los pavimentos deteriorados de asfalto el material es removido y reutilizado cada año, siendo el producto más reciclado de dicho país, según apunta Montejo (2004).

Connótese, en este particular, que la norma Venezolana técnica Fondonorma (NTF 2000-1:2009), permite la incorporación de material, producto del escarificado de carpetas asfálticas hasta un 30% dando paso al país se una al movimiento mundial ambientalista, que busca el uso adecuado de los recursos naturales con el objeto de reducir el impacto ambiental que genera el uso indiscriminado de materiales y el bote desmedido de los mismo.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo se podría garantizar que en una mezcla asfáltica en caliente la incorporación de material producto de la escarificación con peso mayor al treinta por ciento del peso total del agregado, es factible para la construcción de pavimentos reciclados?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar las propiedades Marshall de mezclas asfálticas en caliente diseñadas con agregado pétreo y material producto del escarificado de carpetas asfálticas con porcentajes de participación superior al treinta por ciento del peso total del agregado

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el material escarificado.
- Determinar propiedades del cemento asfáltico.
- Definir características del agregado pétreo
- Diseñar mezclas asfálticas con incorporación de material producto de la escarificación mayor al 35 % del peso del agregado.
- Evaluar las propiedades Marshall de la mezcla asfáltica diseñada con la incorporación de material producto de la escarificación mayor al 35% del peso del agregado.

1.4. Justificación

Efectivamente, para la construcción de carpetas asfálticas se emplean materiales pétreos y ligantes asfálticos, los cuales en su totalidad, son recursos naturales no renovables y que en el caso de los agregados, presentan en la actualidad gran dificultad para su obtención por la explotación indiscriminada de quebradas y ríos, según refiere el Instituto Nacional de Vías (2002). Esto, aunado al cambio climático que ha aumentado los periodos de sequía en el país, ha mermado la capacidad de los cauces de dichas cuencas hidrológicas de reponer el material explotado, encareciendo su valor y haciendo daño al ambiente, dándole importancia al presente estudio.

Para la obtención de los materiales pétreos, se requiere la explotación de grandes cantidades de roca, proceso en el cual se destruye capa vegetal y en la mayoría de los casos, no se le hacen trabajos de recuperación, quedando en esas condiciones a través de los años. De modo que, el consumo energético en estos procesos es bastante considerable para la extracción, trituración y transporte de dichos materiales.

De allí, que la incorporación de material deteriorado y envejecido en una mezcla asfáltica nueva, reduciría significativamente la cantidad de material requerido para dicha mezcla, optimizando costos y produciendo una menor cantidad de energía, consecuentemente, una menor huella ecológica, brindando un beneficio bastante significativo al ambiente y con ello a la colectividad.

Justificándose así, la presente investigación, al pretender el diseño de mezclas asfálticas en caliente con la incorporación de material proveniente de la escarificación con un peso mayor al treinta por ciento del peso total de los agregados que actualmente está limitado por la Fondonorma (NTF 2000-1:2009), lo que de alguna manera restringe el

reciclado, y buscándose así ampliar la posibilidad de utilización del material reciclado.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se recopilan todos los aspectos teóricos en los cuales se fundamentó la evaluación de las propiedades Marshall de mezclas asfálticas diseñadas con agregado pétreo y material producto del escarificado (MAR) de mezclas asfálticas en caliente con porcentajes de participación al treinta por ciento del peso total del agregado. Estos implican tanto la revisión de la literatura correspondiente como los antecedentes de la investigación, las bases teóricas, definición de términos básicos y el sistema de variables.

De este modo, según Arias (2006), el marco teórico de la investigación o marco referencial, puede ser definido como el compendio de una serie de elementos conceptuales que sirven de base a la indagación por realizar.

2.1 Antecedentes de la investigación

En la incansable búsqueda del ser humano por adaptarse a su medio y distintas necesidades, desde las civilizaciones más antiguas hasta la actualidad, el hombre se las ha ingeniado para utilizar y aprovechar distintos recursos naturales que han impulsado grandes ideas y proyectos que han revolucionado la vida en grandes y pequeñas ciudades. Sin embargo, este aprovechamiento ha sido desmedido y en el último siglo, las consecuencias de ello no es más que un desgaste y en muchos casos destrucción de ecosistemas naturales que en algún momento fueron estables. Esto hoy en día se conoce como impacto ambiental, y la tendencia de las nuevas tecnologías en los campos de ingeniería es seguir evolucionando como lo ha sido desde un principio, pero a la búsqueda se le ha sumado una nueva noción ecologista, que busque la reducción importante de este impacto ambiental.

La industria de la construcción, siempre dispuesta a cubrir algunas de las necesidades como antes se mencionó, incluso algunas indispensables como lo son la

vivienda y el transporte, ha dejado significativos problemas ambientales, puesto que los diferentes procesos que le atienden, significan un importante impacto en extracción de materiales necesarios para llevar a cabo a construcción de distintas estructuras que brindan un servicio, como por ejemplo, los diferentes agregados necesarios para elaborar una mezcla de concreto, o una mezcla de asfalto para elaborar una carretera. Así como también, diferentes desechos producidos por esas mismas estructuras, que tras haber cumplido su vida útil, debe considerarse su reconstrucción, tal como es el caso de los pavimentos asfálticos flexibles.

Pensando en esto, se han realizado diferentes investigaciones que buscan demostrar distintos aspectos en nuevos diseños y proyectos que reduzcan significativamente el impacto ambiental y no detengan el progreso evolutivo de nuevas tecnologías que ayuden a la civilización a seguir satisfaciendo sus necesidades. Entre esos diseños y proyectos, los investigadores en el área de construcción de pavimentos, han realizado distintas propuestas en el desarrollo de pavimentos ecológicos, llamados así pues se caracterizan por estar compuestos parcialmente por materiales reciclados, específicamente materiales que sustituyen agregados pétreos que conforman la mezcla asfáltica. Estos materiales han constituido una gran gama, y en su mayoría han sido materiales que en alguna oportunidad se pudo suponer que no tendrían algún otro uso y serían desechados como por ejemplo: la escoria de acería, bolsas plásticas, caucho, e incluso material producto de la escarificación de carpetas asfálticas. Entre algunas de esas investigaciones, podemos apreciar las siguientes:

Avendaño, K. y Rodríguez, B. (2010), egresadas de la Universidad Centro-Occidental Lisandro Alvarado, realizaron la investigación titulada: “**Diseño y producción de una mezcla asfáltica en caliente con la Incorporación de material proveniente de la escarificación de carpetas asfálticas**”. El objetivo de la investigación fue realizar el diseño de una mezcla asfáltica incorporando material producto de la escarificación, bajo la metodología Marshall, para tránsito bajo, tipo M19 según la norma Técnica Venezolana Fondonorma (NTF 2000-1:2009). Fueron evaluadas las propiedades físico-mecánicas de la nueva mezcla diseñada para

determinar si presentan valores favorables o desfavorables. Se realizó también la producción de la mezcla diseñada en una planta Drux Mixer (Tambor Mezclador) de tipo continua con el objetivo de determinar la factibilidad de la producción de este tipo de mezclas en plantas para mezclas asfálticas incorporando el material del escarificado como otro agregado. Luego se realizó el extendido y compactado de la mezcla producida para determinar su trabajabilidad y comportamiento cuando se realiza el extendido con los equipos y cuadrillas de colocación del asfalto convencional. Concluyeron que la mezcla realizada cumple con las propiedades Marshall establecidas en la norma NTF 2000-1:2009, teniendo solo un comportamiento irregular en valores de vacíos de agregado mineral, pero la producción en planta fue factible aunque deban realizarse ajustes a su estructura. El extendido presentó características similares a la de una mezcla convencional y se obtuvo el porcentaje de compactación ideal estipulado en la norma.

Esta investigación es un gran soporte para el presente trabajo de grado, pues los datos y base teórica del mismo, demuestran la factibilidad del uso de material producto de la escarificación en la producción de mezclas asfálticas en caliente en una planta de asfalto, con características relativamente aceptables según la normativa vigente. Lo cual sustenta la propuesta del uso de este material producto del escarificado como sustituto de agregado, en la búsqueda de alternativas ecológicas que buscan disminuir el impacto ambiental y no irrumpen en los procesos tradicionales de producción y colocación de mezclas asfálticas en la construcción de pavimentos.

Fernández, V (2008), en su trabajo de grado presentado en la Universidad Simón Bolívar, el cual se titula: “**Caracterización de Asfalto Modificado con Caucho Molido Proveniente de Neumáticos Usados**” estudió las variaciones fisicoquímicas y reológicas de mezclas de asfalto proveniente de crudo Boscán, con caucho molido (CRM) de neumáticos de camiones tipo 350. Analizó dos marcas comerciales, incorporando diferentes porcentajes de adición (5% y 10% p/p) y con tamaños de partículas entre 212-425um y 425-600um. Analizó también variaciones en las propiedades usando dos tiempos de mezclado del asfalto con el caucho (45min y

180min). Sus resultados arrojaron que la incorporación de CRM aumenta el grado de PG 70-22 a PG 76-22 con tan solo 5% p/p de CRM, permitiendo una mayor resistencia a la deformación permanente, creando un asfalto más atractivo para la pavimentación.

Esta investigación sirvió para extraer información contenida entre su marco teórico y metodológica, que demuestra la posibilidad de sustituir los agregados convencionales en la elaboración de mezclas asfálticas por agregados que cambien y mejoren las propiedades propias de la mezclas, concluyendo así que se pueden realizar diseños de mezclas con una variedad de materiales obtenidos mediante el reciclaje, y que estos son capaces de soportar las distintas solicitaciones a las cuales es sometida la mezcla, apoyando la factibilidad en el uso de alternativas como el reciclaje, para reducir el impacto ambiental que ocasiona la extracción de agregados y no alteran el comportamiento de forma significativa de una mezcla de asfalto modificada.

Del Pozo, J., Del Val, Miguel A., Gallego J., Querol, N. y Sampedro A, en el artículo publicado, el cual tiene como título: **“Huella de carbono del reciclado en planta asfáltica en caliente con altas tasas de RAP”** tras su investigación, analizan y describen el análisis de “huella de carbono” desde el punto de vista de la sostenibilidad, del empleo de RAP (Recycling Asphalt Pavement, por sus siglas en inglés) en la fabricación y ejecución de mezclas bituminosas en caliente. Se desarrolló de forma específica para el análisis de materiales asfálticos, a partir de una metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) que ha considerado como unidad funcional la tonelada de mezclas asfáltica fabricada y colocada en obra, y como eco indicador el kilogramo de CO₂ equivalente. Esta metodología se basó en datos de consumos y emisiones reales de instalaciones de extracción de áridos, plantas asfálticas y obras de pavimentación. Consideró dos aspectos desde el punto de vista de sostenibilidad, los cuales son: La durabilidad y la reciclabilidad. Los resultados arrojados con esta metodología fueron obtenidos de distintas mezclas asfálticas recicladas con presencia de material RAP en distintos porcentajes de participación, y a su vez, mezclas asfálticas con presencia de RAP-caucho, también en diferentes porcentajes de participación. Todos los resultados obtenidos fueron comparados con una mezcla tradicional de referencia, en la que sólo

se ha empleado árido virgen. Como resultado, la incorporación de RAP en la fabricación de las mezclas asfálticas en caliente supone una notable disminución en las emisiones de CO₂ equivalente, gracias sobre todo a los menores consumos de áridos y de asfalto, aunque en el proceso de mezclado en planta, hay un leve incremento debido al mayor calentamiento requerido.

Este artículo muestra un estudio ambiental, que demuestra que el reciclado de algún material que pueda sustituir los agregados pétreos áridos en el diseño, producción y colocación de mezclas asfálticas logra reducir considerablemente las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), en la extracción de dichos áridos, logrando también una reducción del impacto ambiental que genera todo aquel proceso, en el cual debe extraerse, movilizarse, clasificarse, etc. Dando un sustento válido a esta investigación.

2.2 Bases Teóricas

Entre las estructuras más importantes que se ha ingeniado el hombre, que hoy en día juegan un rol fundamental en la economía y en el desarrollo de las actividades en la vida moderna están las carreteras. Estas están diseñadas por una superestructura llamada pavimento, el cual está compuesta por un subconjunto de estructuras que tienen como función distribuir equitativamente los esfuerzos generados por el tráfico vehicular que circule por la carretera.

Las diferentes estructuras de las cuales están compuestos los pavimentos, dependen directamente del esfuerzo que deban soportar y las propiedades físicas de los materiales de las cuales estén compuestas. Estas estructuras generalmente son: superficie de rodamiento, base, sub-base y sub-rasante, y cada una de ellas tiene una función específica que va asociada a una respuesta a sollicitaciones (estabilidad, resistencia, uniformidad, rigidez, etc.).

Convencionalmente, los pavimentos se clasifican en: pavimentos flexibles, y pavimentos rígidos. La diferencia entre ellos obedece estrictamente al comportamiento de la capa de rodamiento refiriéndose a cómo soporta y distribuye los esfuerzos. Otra manera de diferenciarlo, es el tipo de material con el cual está constituido. Los pavimentos rígidos suelen estar constituidos por una losa de concreto hidráulico

apoyado sobre una base, o directamente sobre la sub-rasante (el terreno adecuado a soporte mediante un proceso de compactado.), esta trabaja por la alta rigidez de los materiales que lo componen, es decir, el concreto. Esta losa que sirve de capa de rodamiento absorbe la mayor parte de los esfuerzos de las cargas generadas por el tráfico, y la magnitud de los esfuerzos que se transmiten a la sub-rasante es pequeña.

En cambio, un pavimento flexible está conformado por una capa asfáltica en la superficie de rodamiento, la cual se apoya en una base y sub-base granulares, las que a su vez descansan sobre la sub-rasante. Esta superficie por la flexibilidad que ofrece el cemento asfáltico distribuye el esfuerzo de forma cónica, debido a que la calidad resistente de las capas es mayor de arriba hacia abajo, generando una vulva de presiones inversa, con el objetivo de que no se exceda la resistencia de ninguna de las capas inferiores, ni de la sub-rasante

En el presente trabajo de investigación se diseñará y evaluará una mezcla asfáltica, para la elaboración de pavimentos flexibles. Una mezcla asfáltica es la combinación de un ligante o cemento asfáltico que se encuentra a altas temperaturas, (aproximadamente entre 135°C – 170°C) con materiales pétreos calientes. Los materiales pétreos, o también llamados agregados son generalmente una combinación de distintos tamaños de piedra, intermedio y fino. Sus propiedades estarán definidas según la localización de la cuál son extraídos, así como también el método de extracción.

A continuación, para poder comprender cómo se debe diseñar y evaluar una mezcla asfáltica se describirán los distintos materiales que la conforman, y a su vez, se tomará en cuenta la incorporación de material producto del escarificado para los diseños de las mezclas en estudio, como sustituto de los agregados pétreos convencionales.

2.2.1 Cemento asfáltico

La American Society for Testing and Materials (*ASTM*) define al asfalto como un material ligante de color marrón oscuro o negro, constituido, principalmente, por betunes que pueden ser naturales u obtenidos por refinación del petróleo.

Es un material cementante el cual posee una consistencia variable que depende, o va en función a la temperatura en la que éste se encuentre por lo que se caracteriza relevantemente como un material termoplástico.

Su consistencia a temperaturas ambientales normales le da una consistencia entre sólida y semisólida. A medida que la temperatura aumenta, el asfalto comienza a tomar propiedades como viscosidad, tornándose líquido y maleable.

Se presenta en proporciones variables en la mayoría de los petróleos crudos y varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido a temperaturas ambientes normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de una mezcla asfáltica en caliente.

El asfalto se puede clasificar de acuerdo a su origen: los que provienen de derivados del petróleo y los de origen natural. Sin embargo, los asfaltos más utilizados en el mundo hoy en día, son los derivados del petróleo, los cuales se obtienen por medio del proceso de destilación industrial del crudo. El cual consiste en extraer el petróleo de los pozos, y someterlo a un proceso en el que se separan las fracciones livianas como la nafta y keroseno de la base asfáltica mediante la vaporización, fraccionamiento y condensación de las mismas, obteniendo como residuo al asfalto.

Entre las ventajas que presenta, según Corredor (2011), “son cementantes, se adhieren fácilmente, son impermeables y muy durables. Son sustancias que imparten flexibilidad... Son altamente resistentes a la acción de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales.”.

Al diseñar una mezcla asfáltica incorporando material producto del escarificado, es importante conocer las especificaciones de calidad del cemento asfáltico, comprobando que sus propiedades cumplan con los requisitos establecidos en la norma que se esté empleando para el diseño de la mezcla, de tal manera que la combinación del cemento asfáltico presente en el material escarificado, el cual está envejecido, y el cemento asfáltico nuevo tengan una adecuada adherencia que cumpla

con las especificaciones de mezclas tradicionales y no comprometa de manera importante el comportamiento ideal de diseño.

2.2.2 Especificaciones de calidad para el asfalto.

Según Corredor (2011), “Las “Normas venezolanas para construcción de carreteras”, conocidas como COVENIN 2000-87, han sido establecidas por la Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN), organismo adscrito a SENCAMER, que tiene bajo su responsabilidad todo aquello relacionado con la normalización a nivel nacional.”

Es entonces, y considerando esto para esta investigación, sólo se considerarán las especificaciones de cemento asfáltico especificadas en esta norma, aunque cabe destacar que existen otras especificaciones según el Instituto del Asfalto Americano (IDA), el cual lo clasifica en función de la viscosidad original de la muestra, o de la viscosidad después del ensayo en estufa de película delgada para los asfaltos envejecidos en laboratorio. Estas especificaciones reflejan un criterio más técnico, ya que representa condiciones del material para el momento en que comenzaría a prestar servicio sobre la vía, es decir después de haber sido trabajado en planta y mezclado con los agregados, lo que da arroja buenos resultados en la data de propiedades de los cementos asfálticos.

Las especificaciones indicadas en la norma COVENIN 1670-95, para la calidad vigente de concretos asfálticos a ser comercializados en Venezuela, define los tipos de asfalto a diferencia de la del IDA, en función de su viscosidad absoluta entre 100, así un asfalto A-20 significa que se presenta un cemento asfáltico de viscosidad 2000 poise.

2.2.3 Composición del Asfalto

2.2.3.1 Propiedades Químicas del Asfalto

El asfalto está compuesto básicamente por combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono, también llamado hidrocarburos y en algunas trazas de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos metálicos como el vanadio y el níquel. Esto sujeto

específicamente al origen del crudo de su procedencia y el proceso de refinación de este.

Gracias a esta composición, el asfalto tiene propiedades únicas que lo hacen muy versátil como material de construcción de carreteras.

Al colocar el asfalto en un solvente no polar como el pentano, hexano o heptano, es posible dividir este elemento en dos grandes mezclas complejas: asfáltenos y máltenos. La proporción de cada uno de ellos en el asfalto puede variar debido a innumerables factores, incluyendo altas temperaturas, exposición a la luz y al oxígeno, tipo de agregado usado en la mezclas de pavimento, y espesor de la película de asfalto en las partículas de agregado.

Lo asfáltenos no se disuelven en el solvente polar, y una vez ocurrida la separación, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de grafito, lo que le da al asfalto su color característico y su dureza.

Los máltenos por otro lado, si se disuelven y una vez ocurrida la separación, se presencia un líquido viscoso compuesto por resinas y aceites. Las resinas, son por lo general líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro las cuales proporcionan cualidades de adhesión en el asfalto, ofreciendo la pegajosidad entre sus características, mientras que los aceites, suelen ser de color más claro y actúan como un medio de transporte para los asfáltenos y las resinas gracias a sus propiedad de insolubilidad.

Las reacciones y cambios que pueden ocurrir incluyen: evaporación de los compuestos más volátiles, oxidación de las moléculas de hidrocarburos con moléculas de oxígeno, polimerización, etc. que pueden alterar, o afectar considerablemente las propiedades del asfalto.

Las resinas se convierten gradualmente en asfáltenos, durante estas reacciones y los aceites se convierten en resinas, ocasionando así un aumento en la viscosidad del asfalto.

2.2.3.2 Propiedades Física del Asfalto.

El asfalto ofrece grandes ventajas como material, entre ellas su gran versatilidad, esto debido a sus distintas propiedades físicas. Las más importantes para

el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión y cohesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento, pureza y gravedad específica.

Todas y cada una de estas propiedades tendrán una variación considerable en la mezcla asfáltica en función del cumplimiento y buena praxis del diseño, elaboración, transporte y colocación de la mezcla.

a) Durabilidad

La durabilidad en un material asfáltico se define como la capacidad de mantener sus propiedades originales cuando es sometido a distintos procesos normales en el proceso de construcción de una carpeta asfáltica para una carretera. Estos procesos son los de almacenamiento y mezclado en planta, transporte, extendido y compactación del pavimento, y luego durante la etapa de servicio a lo largo del periodo de servicio.

Es evaluada a través del desempeño o comportamiento de la mezcla en el pavimentos, y depende tanto de las características propias del asfalto, así como otros factores ajenos a él como el diseño de la mezcla, características de los agregados, proceso de producción y compactación, condiciones climatológicas del lugar donde se construye el pavimento.

Debido a tantas variables, es complejo definir la durabilidad en término de resultados de ensayos directos sobre el asfalto.

La pérdida de durabilidad a lo largo de estos procesos, se le denomina envejecimiento. Es algo complejo de evitar debido a tantas variables, y factores como los climatológicos e indudablemente imposible de evitar por lo que solo se podría controlar buscando condiciones efectivas durante el proceso.

b) Endurecimiento y Envejecimiento

El proceso de endurecimiento del asfalto es causado principalmente por el proceso de oxidación el cual ocurre normalmente a altas temperaturas y en películas delgadas de asfalto a medida que es expuesto al aire.

Este proceso es más severo en la etapa de mezclado donde los agregados han sido calentados previamente en el tambor de secado para que pierdan el mayor porcentaje

de humedad posible, y el asfalto debe estar a una temperatura suficientemente alta para tener la consistencia más líquida posible (menos viscoso) y este se encuentra en películas delgadas mientras está revistiendo las partículas de agregado.

No todos los asfaltos endurecen a la misma velocidad ni tienen el mismo grado de endurecimiento con el tiempo cuando son calentados en películas delgadas, por lo que se recomienda que deben tomarse muestras por separado tras realizar una mezcla, ensayarlas y determinar sus características de envejecimiento, y así poder ajustar las técnicas constructivas para minimizar el endurecimiento.

Entre estos ajustes, se incluyen la disminución de la temperatura del mezclado y también el tiempo de mezclado. Dependerá directamente del diseño de la mezcla y distintos factores propios del proyecto en ámbitos constructivos.

Según Corredor (2011), En resumen, existen muy pocas acciones que puedan ser tomadas después de que el proceso de envejecimiento se ha iniciado, lo que debe hacerse es minimizar su velocidad de avance mediante acciones como:

- a) Diseño adecuada de las mezclas para obtener vacíos bajos.
- b) Diseño adecuado de mezclas seleccionando mezclas con granulometría densa y evitando mezclas con granulometría abierta.
- c) Control en las temperaturas de almacenamiento y mezclado del ligante, evitando superar las máximas recomendadas según el tipo de asfalto.
- d) Control de la temperatura de calentamiento de los agregados en la planta de mezclado, tratando de que sean calentados a la misma temperatura que el asfalto y en todo caso evitando que excedan los 170°C.
- e) Reducción al mínimo del tiempo de mezclado del asfalto y los agregados.

- f) Verificación de los proceso de compactación en campo con el fin de que pueda ser obtenida la densidad establecida en el proyecto.

c) Adhesión y Cohesión

Adhesión se entiende como la capacidad de un material en adherirse a otro, y Cohesión se entiende como la capacidad de un material de mantener firmemente sus moléculas adheridas a otro material.

Hablando de asfalto, podríamos entonces decir que se busca un nivel efectivo de estas características entre el asfalto y el agregado, siendo una característica de gran importancia para lograr que ambos materiales se mantengan firmes sin cambiar de posición y el asfalto cumpla su función cementante en la construcción de carreteras.

d) Susceptibilidad a la temperatura

Es un material termoplástico; esto quiere decir que se torna más duro (más viscoso) a mediada que su temperatura disminuye, y más blando (menos viscoso) a medida que su temperatura aumenta. Es una de las propiedades que debe ser atendida con prioridad en un asfalto, y esta puede variar entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen consistencia similar.

La importancia de cuán susceptible es un asfalto a la temperatura que va a ser utilizado, radica en la dependencia de esta característica en el proceso de producción de la mezcla, así como también en el proceso de colocación y compactación de la mezcla sobre la base de la carretera.

Al momento de producir la mezcla, el asfalto debe tener una temperatura suficientemente alta para garantizar un nivel bajo de viscosidad que garantice la fluidez necesaria para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, tenga una trabajabilidad adecuada para su colación en la rasante y las partículas de agregados se logren desplazar una respecto a otra durante la compactación, garantizando la uniformidad esperada en la carpeta de rodamiento. Al mismo tiempo, durante el proceso de mezclado, esta temperatura tampoco puede ser excesivamente alta. Se estima que a un máximo de ciento setenta grados centígrados (170°C), debe ocurrir

este proceso; a temperaturas más altas, el ligante asfáltico es susceptible a oxidarse y quemarse, lo que supondría una pérdida importante de sus propiedades cementantes.

e) Pureza

Según Corredor (2011), Refiere al grado de carencia de materiales insolubles en bisulfuro de carbono. Los asfaltos provenientes de procesos de refinación son, en forma general, más del 99% soluble y por lo tanto son prácticamente bitúmenes puros.

f) Gravedad específica

Según Corredor (2011), Es la relación de su masa a una temperatura determinada y la masa de un volumen igual de agua a la misma temperatura. Cambia cuando el asfalto se expande al ser calentado

2.2.4 Materiales pétreos para carpetas asfálticas.

Como se mencionó antes, las mezclas asfálticas se componen de un ligante asfáltico, el cual tiene como función principal cementar este material con un conjunto de agregados, también conocidos como roca, material granular, o agrado mineral. Estos materiales son partículas graduadas o fragmentadas seleccionados en función del diseño de la mezcla, bajo diferentes criterios que depende directamente de sus características físicas. Estas características son de vital importancia, y debe garantizarse la calidad en los agregados para garantizar la calidad de la mezcla asfáltica; ya que los agregados constituyen aproximadamente un 90% a un 95% del peso total de la mezcla y, aproximadamente entre el 75% al 85% del volumen total, con lo que podemos deducir que juegan un roll importante en la respuesta a solicitudes a las que está sometida la mezcla.

La clasificación de los agregados comprende una gran gama de criterios, y es que esta va en función de diferentes aspectos como la fuente de su procedencia, el tamaño e incluso su composición.

La procedencia del material, es uno de los aspectos más importantes y resaltantes en esta investigación debido a que asociamos la incorporación de material producto del escarificado a la disminución significativa del proceso de extracción de agregados en canteras.

2.2.5 Propiedades Principales de los Agregados

a) Granulometría

La granulometría de una masa de agregados se define como la distribución del tamaño de sus partículas, y se determina haciendo pasar una muestra representativa del material por una serie de tamices ordenados por abertura, de mayor a menor. La granulometría se relaciona directamente con la trabajabilidad del concreto, y así con todas las propiedades ligadas a ésta. En esto radica la importancia de estudiar la granulometría de los agregados. La granulometría de la arena tiene mayor influencia sobre la trabajabilidad que el agregado grueso en razón de su mayor valor de superficie específica.

b) Tamaño Máximo

El tamaño máximo del agregado generalmente está condicionado por las exigencias de que pueda entrar fácilmente en los encofrados y entre las barras de las armaduras. Se entiende por tamaño máximo de un agregado la abertura del tamiz o malla menor a través del cual debe pasar como mínimo el 95 por ciento ó más del material cernido.

c) Peso Unitario

Es el que se toma como volumen de referencia. Existen dos clases: el suelto, el cual se determina al dejar caer libremente el agregado dentro del recipiente, y el compacto: el material se compacta de modo similar a como se hace con el concreto.

d) Peso Específico

Es el peso de un cuerpo dividido entre su volumen. Los materiales granulométricos tienen dos tipos de pesos específicos: el aparente, que es el peso de un conjunto de agregados dividido entre su volumen incluyendo los espacios vacíos entre granos, y el absoluto: peso de un grano dividido entre su volumen.

e) Humedad y Absorción

Es la diferencia entre el peso del material húmedo y el mismo, secado al horno. Se suele expresar como porcentaje en peso, referido al material seco. Esta se encuentra en los agregados de dos maneras diferentes: uno es rellenando los poros y micro poros internos de los granos, y la otra es como una película envolvente más o menos gruesa.

La absorción, o diferencia entre el grano seco y el húmedo, o entre el seco y el saturado con superficie seca, puede retirar, por el contrario importantes cantidades de agua de la mezcla. Estos aportes o retiros alteran consecuentemente la relación agua - cemento, o valor de alfa.

El agua de mojado superficial de los granos del agregado hace que estos queden ligeramente separados entre sí por la película que los rodea, lo que da lugar a que, en su conjunto, el material se “hinche”. En los agregados gruesos este efecto es poco perceptible, mientras que en las arenas, debido a su mucha mayor superficie específica, el fenómeno es notable.

f) Segregación

Cuando se manejan agregados en los que hay presencia de granos con tamaños muy contrastantes, se puede presentar tendencia a su separación, en lo que denominamos segregación del agregado, lo cual generaría concreto de calidad heterogénea y dudosa. La tendencia a la segregación se contrarresta manejando los agregados en fracciones separadas, de acuerdo a su tamaño, que solo se combinan en el momento del mezclado. A veces la naturaleza produce gradaciones granulométricas combinadas, con gruesos y finos, y que teóricamente podrían ser adecuadas para usarse directamente como agregados (por ejemplo el material que se conoce como granzón). Se suele oponer a ello su tendencia a la segregación y su variabilidad granulométrica, recordando que más que una buena gradación para determinado concreto, lo que se debe asegurar es su constancia.

g) Impurezas

Al agregado los pueden acompañar algunas impurezas perjudiciales, la mayoría de origen natural y acompañando a la arena. Las especificaciones normativas establecen límites para estas impurezas.

El humus o materia orgánica procedente de la descomposición de vegetales, acompaña a veces a los agregados. Hay un procedimiento normativo sencillo para obtener una estimación de su proporción, descrito en la norma COVENÍN N° 256, “Método de ensayo para la determinación cualitativa de impurezas orgánicas en arenas

para concretos. Ensayo colorimétrico y ASTM C 40, basado en que la reacción de la materia orgánica con los álcalis colorea una solución con un color más o menos intenso, según la proporción de materia orgánica. Otro procedimiento, de uso más específico para conocer el nivel orgánico en las aguas, es medir el oxígeno que consume la materia orgánica al oxidarse.

La materia orgánica en descomposición puede producir trastornos en las reacciones del cemento. El fraguado puede ser alterado, e incluso impedido, como es el caso en presencia de abundantes azúcares. También se pueden ver alterados el endurecimiento y, a veces, la reacción de los aditivos químicos. Algunos tipos de materia orgánica no llegan a producir alteraciones importantes por lo cual, en términos generales, lo más recomendable es hacer pruebas directas en mezclas de estudios con los materiales que se pretende usar.

Otras impurezas importantes son las sales naturales, entre las cuales, las más frecuentes son el cloruro de sodio y el sulfato de calcio, o yeso, o bien las sales procedentes de efluentes industriales, que pueden tener una composición muy variada. El Ion cloruro, de la sal, produce la corrosión de las armaduras del concreto armado, y el Ion sulfato del yeso ataca la pasta.

La simple detección de estas sales por métodos cuantitativos puede resultar errónea, ya que la estimación de su presencia depende no solo de su proporción, sino también de la cantidad de muestra, de la relación de dilución y de las características del reactivo. En cambio, una determinación semi-cuantitativa, aun cuando el material se tome en volumen pero con relaciones de dilución y de reactivos fijas, y si está bien planificada y desarrollada, resultara confiable y es suficientemente sencilla como para ser practicada en el lugar de explotación, o en la propia obra. Los ensayos normativos son más completos.

h) Resistencia de los agregados

La resistencia de los granos de agregado es también decisiva para la resistencia del concreto fabricado con ellos. Dada su alta proporción en la mezcla, no se puede pretender que esta alcance resistencias muchos mayores a la de los granos pétreos que

la integran. La correspondencia entre las variables relación agua-cemento y resistencia mecánica, está condicionada en buena parte por la calidad resistente de los agregados, además de por la dosis de agua en la pasta. Los concretos hechos con agregados de baja resistencia tienen poca resistencia al desgaste, lo que puede resultar crítico en pavimentos, túneles de desvío en represas, tuberías a presión, etc.

La resistencia más crítica es la del agregado grueso. Para medirla se acude al ensayo de desgaste que produce la máquina conocida como de los Ángeles (Norma COVENIN 266, Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste de agregados gruesos, menores de 38,1 mm (1 1/2 pulgadas), por medio de la máquina de los Ángeles (Ver Figura 1) y Norma COVENIN 267. Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste de agregados gruesos mayores de 19,0 mm, por medio de la máquina de los Ángeles, ASTM C 131, y ASTM C 535), Las normas suelen permitir límites de desgaste del 50 por ciento. Sin embargo, de acuerdo a las condiciones del concreto deseado, se pueden requerir límites más exigentes. Los agregados de alta resistencia al desgaste pueden tener pérdida de menos del 20 por ciento.

i) Forma de Partículas y Textura superficial

La forma de partícula y la textura superficial de un agregado influyen más en las propiedades del concreto fresco, que en las propiedades del concreto endurecido. Para producir un concreto trabajable, las partículas alongadas, angulares, de textura rugosa necesitan más agua que los agregados compactos, redondeados y lisos. En consecuencia, las partículas de agregado que son angulares, necesitan un mayor contenido de cemento para mantener la misma relación agua-cemento. Sin embargo, con una granulometría satisfactoria, los agregados triturados y no triturados (de los mismos tipos de rocas) generalmente dan la misma resistencia para el mismo factor de cemento, los agregados pobremente graduados o angulares pueden ser también más difíciles de bombear. La adherencia entre la pasta de cemento y un agregado generalmente aumenta a medida que las partículas cambian de lisas y redondeadas a rugosas y angulares. Este incremento en adherencia se debe considerar al seleccionar

agregados para concreto en que sea importante la resistencia a la flexión o donde sea necesaria una alta resistencia a la compresión.

Los contenidos de vacíos del agregado compactado fino o grueso, se pueden usar como un índice de las diferencias en la forma y textura de agregados con igual granulometría. La demanda de agua de mezclado y de mortero tiende a aumentar a medida que aumenta el contenido de vacíos del agregado. Los vacíos entre las partículas de agregado se incrementan con la angularidad del agregado. El agregado debe estar relativamente libre de partículas planas. Las partículas planas y alongadas se deben evitar o al menos limitar a aproximadamente un 15 por ciento del peso total del agregado.

2.2.6 Método Marshall

El método Marshall para diseño de mezclas asfálticas, fue desarrollado a finales de los años 40 por un ingeniero de bitúmenes del departamento de carreteras del estado de Mississippi llamado Bruce Marshall. El cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, a través de varios estudios de correlación, de extensas investigaciones, un aparato y método de proyecto de mezclas asfálticas lo mejoró e incorporó ciertas modificaciones al método, conduciéndolo al método actual, el cual fue adoptado por la ASTM en Mississippi.

El diseño mediante este método tiene como objetivo determinar el porcentaje óptimo de ligante en la mezcla producida para una combinación específica de agregados. Esto mediante el análisis de curvas de diseño, que representan en función de distintos contenidos de ligante las siguientes propiedades: Densidad de la mezcla (peso unitario), porcentaje de vacío totales, porcentaje de vacío en el agregado mineral (VAM), estabilidad, flujo, y vacíos llenados con asfalto. Al mismo tiempo provee información sobre el contenido de vacío que debe existir durante la construcción del pavimento.

El método Marshall, desarrollado originalmente fue aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25mm (1”) o menor. Luego de modificarse, se desarrolló para tamaños

superiores máximos de 38mm (1,5”) y está propuesto para el diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa.

Se utilizan especímenes de prueba estándar de 64mm (2 ½”) de alto y 102mm (4”) de diámetro y se preparan mediante un procedimiento que involucra el calentamiento de los componentes de la mezcla, su combinación y la compactación de los mismos descritos en la norma ASTM D 1559 en su capítulo cuarto. Se realizan series de especímenes, cada una con la misma combinación de agregados pero con diferentes contenidos de asfalto.

Posteriormente, se elaboran tres tipos de ensayos para conocer las características volumétricas y mecánicas.

El primero es la determinación de la gravedad específica, la cual puede desarrollarse una vez que el espécimen se haya enfriado a un cuarto de la temperatura de su preparación. Este ensayo se realiza conforme a la Norma ASTM D1188, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando parafina, esto si la absorción es mayor al 2%, en caso contrario, se emplea la Norma ASTM D2726, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas mediante superficies saturadas de especímenes secos.

El segundo, es el ensayo de estabilidad y flujo, descrito en la Norma ASTM 1559-89 el cual se realiza preferiblemente veinticuatro horas de haber compactado la mezcla. Buscando garantizar el menor gradiente de temperatura, de manera que el espécimen pierda su capacidad termoplástica y al realizar el ensayo los resultados sean consistentes.

El ensayo de estabilidad está destinado a medir la resistencia a la deformación de la mezcla, y arroja como resultado la carga bajo la cual el espécimen entra en un estado de cedencia o falla total, esta carga máxima es el Valor de Estabilidad Marshall.

Por otra parte, la determinación de la fluencia mide la deformación bajo carga que ocurre en el espécimen, y está evidenciada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

Por último, el tercer ensayo es el de densidad y vacíos el cual se realiza con los especímenes ensayados previamente en el procedimiento descrito en la Norma ASTM 1559-89 de estabilidad y flujo. Esto con la finalidad de determinar la gravedad específica teórica máxima mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM D2041. Esto se realiza a los diferentes contenidos de asfalto, preferiblemente los que estén cerca del contenido óptimo de asfalto esperado.

2.2.7 Propiedades Marshall

a) Densidad

La densidad de la mezcla compactada se define como su peso unitario, y se expresa generalmente, en kilogramos por metro cúbico (Kg/m³). Es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua.

Cuando es obtenido en el laboratorio se convierte en la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento es adecuada, y arroja una estimación de la duración de un rendimiento duradero.

Es importante destacar que las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio, puesto que es inusual que la compactación en campo logre las mismas densidades que se obtienen usando métodos normalizados y controlados de compactación de laboratorio.

b) Vacíos de Aire

Un vacío de aire, representa espacios pequeños, o bolsas de aire que están presentes en los agregados una vez han sido revestidos con la mezcla cementante y han sido compactados.

La presencia de estos vacíos son una característica necesaria en las mezclas densamente graduadas para permitir la compactación adicional bajo el tráfico durante la vida útil de la carpeta asfáltica y proporcionar espacios donde pueda fluir el cemento asfáltico durante este proceso lo que claramente quiere decir que la durabilidad de un pavimento va directamente asociada a estos vacíos.

La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla, es así entonces, que un contenido demasiado alto de vacío

proporciona pasajes, a través de la mezcla por los cuales pueden entrar agentes como el agua y el aire que ocasionarían deterioros alterando el comportamiento natural de las partículas. Caso contrario, un contenido muy bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie, logrando significativas pérdidas de propiedades adherentes y estables de la carpeta.

Estos vacíos oscilan entre el 3% y 4%, dependiendo del diseño de la mezcla, en función de la densidad del diseño. Entre más alta sea la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa.

c) Vacíos en el Agregado Mineral (VAM)

Refiere a los espacios de aire que existen entre las partículas del agregado pétreo en una mezcla asfáltica compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto, considerando entonces que es el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en el diseño de la mezcla. Cuanto mayor sea el vacío de agregado mineral, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto y del mismo modo, mientras más gruesa sea la película de asfalto que cubra las partículas de agregado, más durable será la mezcla.

Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VAM por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir los VAM para economizar el contenido de asfalto.

d) Contenido de asfalto

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir cualidades deseadas en la mezcla. Para que éste sea óptimo, existirá una dependencia en gran parte, de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción. Y se establece usando criterios dictados por el método de diseño de mezcla seleccionado.

La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir uniformemente todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

La capacidad de absorción del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir que el agregado lo absorba, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto.

Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto contenido en una mezcla en función de esto, refiriéndose al asfalto absorbido y al no-absorbido: el primero es el contenido total de asfalto, refiriéndose a la totalidad de asfalto agregado al momento de la preparación de la mezcla; y está el contenido efectivo de asfalto el cual represente el volumen de asfalto no absorbido por el agregado, y forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados. Se obtiene determinando la diferencia entre la cantidad absorbida de asfalto con el contenido total de asfalto.

2.2.8 Reciclaje de Pavimentos

El pavimento de una carretera está sujeto constantemente a la acción continua del tráfico y distintos factores ambientales, especialmente meteorológicos. Estos factores, junto con el envejecimiento natural de los materiales que lo conforman, hacen que la carpeta de rodamiento sufra un proceso de progresivo deterioro.

Este envejecimiento y deterioro de la carpeta de rodamiento conlleva una disminución paulatina en los niveles de seguridad y confort del tráfico, que al sobrepasar ciertos valores hacen necesaria una operación de conservación.

La conservación de la red vial es en la actualidad un aspecto de gran importancia debido a los recursos que moviliza. El presupuesto necesario para el mantenimiento, así como los problemas ambientales que de él se derivan, justifican la búsqueda de nuevas técnicas que permitan reducir costos y protejan el medio ambiente. En este

contexto, el reciclado, como medio de racionalizar los recursos, se convierte en una alternativa, y por poco, en una necesidad.

El desecho de los materiales envejecidos de carpetas asfálticas de rodamiento, además de provocar problemas relacionados con la adquisición de nuevas materias y con su vertido, resulta contraproducente desde el punto de vista técnico, ya que pese a estar envejecidos, conservan buena parte de sus cualidades. El fresado y reutilización del conglomerado asfáltico comporta un gran ahorro, ya que requiere sólo de un 1% a un 3% de betún adicional, mientras que un nuevo hormigón asfáltico puede necesitar más del 6%. Este aspecto, junto con el reducido coste de transporte y la escasa energía necesaria para la producción de un firme reciclado, hacen que el ahorro energético sea importante respecto de la construcción convencional de pavimentos.

El reciclaje de pavimentos es un método fundamentado en la reutilización del material que conforma una carpeta asfáltica que se considera que ya ha cumplido su vida útil, manteniendo la premisa de que el agotamiento de una estructura vial, no necesariamente significa el agotamiento de los materiales que la constituyen.

2.2.9 Material Asfáltico Reciclable (MAR)

El material asfáltico reciclado (MAR) o Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) por sus siglas en inglés, es pavimento asfáltico que ha cumplido con su vida útil, tras haber sufrido distintos procesos como disgregación, fresado, extraído y triturado de una envejecido en cualquier grado, y áridos cubiertos por este. Sus propiedades dependen directamente de distintos factores y conocerlos es de vital importancia al momento de ser considerada una muestra de este material para la elaboración de una nueva mezcla, debido a la infinita posibilidad de características que puede tener la composición de este material.

Entre las más importantes podemos mencionar:

- a) El tipo de mezcla asfáltica del que proviene, esto pone en evidencia la oxidación que pudo sufrir el cemento asfáltico de la mezcla, dando un diagnóstico del endurecimiento y la pérdida de ductilidad.

- b) La metodología empleada para su extracción, ofrece una característica fundamental del material a la hora de reutilizarse, la cuál es su granulometría. En función del tipo de fresadora a utilizar, esta varía así como su velocidad de avance a la hora de fresar la carpeta. También es importante considerar si el material sufre un proceso de trituración que compromete las propiedades mecánicas del material en búsqueda de una granulometría específica.
- c) Capa del pavimento de donde se extrajo, así como también del proyecto que proviene, esto nos da información de algunas variaciones significativas en cuanto a la calidad de los áridos, contenido y tipo de ligante adherido, lo cual puede influir en la homogeneidad de la mezcla final que se desea fabricar, sobre todo cuando el RAP se emplea en altas tasas.

Este material debe caracterizarse, como si fuera cualquier otro agregado y en particular requiere un estudio adicional en el que se pueda conocer el contenido de cemento asfáltico envejecido existente que está cohesionado con áridos del material, para determinar su porcentaje de participación, así como el contenido y tipo de dichos árido presentes, pues al formar parte de la mezcla debe entenderse que estas aportan propiedades importantes al igual que los áridos convencionales. Estos valores se pueden obtener por medio del ensayo “Método de ensayo para determinar el contenido de ligante asfáltico en mezclas de pavimento (por medio de centrífuga) y la granulometría de los agregados después de eliminar el ligante asfáltico” de FUNDALANAVIAL.

Es importante resaltar, que según la Norma Técnica Fondonorma (NTF 2000-1:2009) limita la utilización de este material hasta un 30% del total del peso de los agregados.

En el presente trabajo, se buscará aumentar este porcentaje con fines investigativos, ampliando el rango de participación de este material reciclado buscando

la disminución del uso de materiales pétreos convencionales, que tras proceso de extracción genera un impacto ambiental significativo.

Según Crespo Villalaz (2011), generaliza los requisitos fundamentales en los materiales pétreos para que tengan un óptimo comportamiento al ser usados en mezclas para carpetas asfálticas y son los siguientes:

- a) No deben emplearse agregados pétreos que presenten más del 35% en peso de fragmentos en forma de lascas o que tengan marcada tendencia a romper en forma de lascas cuando se tritura. Generalmente se consideran como lascas las que tengan una longitud mayor de tres veces la dimensión menor del agregado.
- b) No deben emplearse agregados pétreos que contengan materia orgánica en forma perjudicial o arcilla en grumos.
- c) Los agregados pétreos no deben tener más del 20% de fragmentos suaves.
- d) Los agregados pétreos deben emplearse de preferencia secos o cuando mucho con una humedad a la absorción de ese material. En caso contrario, debe emplearse un adicionante en el asfalto.
- e) El tamaño máximo del agregado pétreo no deberá ser mayor que las 2/3 partes del espesor de la carpeta proyectada.
- f) Tener la suficiente resistencia para soportar, sin romperse, las cargas del equipo de compactación.
- g) La porción que pase la malla a No.40 no debe tener una contracción lineal mayor de tres para materiales que en mezclas en el lugar, su granulometría caiga en las zona número uno, y del 2% si cae en la zona número dos.
- h) Los materiales pétreos deben llenar características granulométricas tales que su curva graficada debe quedar dentro de las zonas marcadas por las curvas siguientes, según sea el caso.

Se recomienda, para dar una superficie antiderrapante, usar siempre como curva de proyecto la curva inferior, o ligeramente más abajo, mostrada para los concretos asfálticos.

- i) El desgaste determinado con la máquina de Los Ángeles no debe ser mayor al 40%.
- j) La absorción del material pétreo no debe ser mayor de 5%.
- k) La densidad del material pétreo no debe ser menor de 2,3%
- l) El material pétreo debe tener buena adherencia con el asfalto, debiendo satisfacer una de las especificaciones siguientes:
 - I.1) Desprendimiento máximo por fricción, 2.5%
 - I.2) Cubrimiento máximo con asfalto inglés, 90%
 - I.3) Pérdida máxima de estabilidad, por inmersión en agua, 25%
- m) El material pétreo debe resistir la prueba de intemperismo acelerado.

2.2.10 Tipos de Reciclaje de Pavimentos

- a) Reciclaje Superficial: El reciclaje superficial es el retratamiento de la superficie del pavimento en bajos espesores generalmente hasta los 2.5cm; en caso de que los deterioros del pavimento no sean atribuibles a deficiencias estructurales. Se incluye todo procedimiento en que la superficie es fresada, cepillada, triturada y adicionada o no de un agente de reciclaje, con o sin la incorporación de pequeños porcentajes de materiales vírgenes, reacondicionada y re compactada. Este proceso puede adelantarse en caliente o en frío. Si es en frío el agente de reciclaje puede aplicarse en forma de emulsión.
- b) Reciclaje en el Lugar (In Situ): Es conocido como reciclaje en frío, consiste en rehabilitar el pavimento asfáltico hasta una profundidad mayor a 2.5cm; involucrando o no el material de la capa base. Para ello el espesor es escarificado y el material trozado resultante es triturado hasta un tamaño adecuado y después mezclado con un agente de reciclaje y eventualmente con cierto porcentaje de agregado nuevo. Como lo dice su nombre el proceso se realiza generalmente en frío y los aditivos más utilizados son emulsiones asfálticas, cementos portland, cal y mezclas de cal.

- c) **Reciclaje en Planta:** Es conocido como reciclaje en caliente, básicamente es escarificar el espesor deseado del pavimento existente y transportar el material trozado a una planta en la que es triturado y clasificado por su granulometría. También puede obtenerse del pavimento por medio del fresado en frío. Luego se reconstruye en caliente la nueva mezcla a reciclar y se agregan materiales nuevos que incluyen agentes de reciclaje y agregados, así como asfalto nuevo. La nueva mezcla en caliente se lleva al sitio de origen o al elegido para su colocación donde se compacta con los métodos convencionales. En todos los casos la estructura resultante del trabajo de reciclaje podrá emplearse como capa de rodadura o base. En este último caso se deberá superponer una nueva capa superficial.

2.2.11 Escarificación de mezclas asfálticas

También llamado fresado, es el proceso mediante el cual se remueve total o parcialmente la capa de la superficie de rodamiento de una estructura de pavimento con la finalidad de adecuar dicha superficie para una posterior rehabilitación o restauración. Este proceso se realiza mediante el uso de maquinaria especializada, conocidas como escarificadoras o fresadoras, las cuales remueven la carpeta empleando dentinas de gran capacidad de arrastre, y posteriormente la trituran.

2.2.12 Diseño de mezclas asfálticas con incorporación de material producto del escarificado

Según, Wirtgen (2004), el diseño de mezclas juega un rol importante en la verificación de la calidad de los materiales reciclados en frío seleccionados para tratamientos con los aditivos escogidos. Su objetivo es establecer el método más efectivo de tratamiento de los materiales en las capas recicladas. Consiste en tomar muestras representativas de la capa a ser reciclada para someterlas a los ensayos correspondientes.

El aspecto más importante en el diseño y selección de una mezcla asfáltica es el aspecto conceptual de funcionamiento de la mezcla, atendiendo siempre al conocimiento de cómo es que esta trabaja. Por supuesto, para diseñar una mezcla

asfáltica se debe tener toda la información sobre la obra a realizar, para determinar así el diseño de la mezcla que mejor se adapte a las condiciones ambientales, de tráfico y suelo de fundación en el que se apoyará la estructura del pavimento.

Existen diversos métodos para el diseño y evaluación de mezclas asfálticas en caliente. En Venezuela se emplea comúnmente el Método Marshall, tanto para el diseño como para el control de calidad de las mezclas.

Toda mezcla asfáltica trabaja en base a propiedades mecánicas, las partículas de agregados son aglutinadas por el ligante asfáltico, produciéndose una trabazón del agregado que da como resultado una mezcla estable, sin producirse reacción química alguna. El agregado pétreo constituye aproximadamente un 95% en peso de las mezclas y en base a lo indicado es responsable principal de las propiedades mecánicas de la mezcla. Y considerando esto en cuenta, cabe destacar la posibilidad de que un porcentaje del peso del agregado, esté conformado por material asfáltico reciclado (MAR), puesto que es un material con características similares al agregado pétreo convencional y para ello, se puede utilizar el método Marshall para diseñar y evaluar las propiedades de esta mezcla con MAR incorporado, planteando la hipótesis de que las propiedades sean adecuadas y deseables.

En forma esquemática, las propiedades a las que se hace referencia son:

- a) Durabilidad: Resistencia a los factores ambientales, y físico – químicos. (oxidación y disgregación.)
- b) Resistencia a la fatiga: Comportamiento deseable ante esfuerzos de tracción inducidos por la repetición continua de carga y descarga. Estos esfuerzos se concentran en la parte inferior de la capa.
- c) Resistencia a la deformación permanente: Estabilidad y rigidez para soportar cargas sin acumular deformaciones excesivas.
- d) Resistencia a la fatiga térmica: Comportamiento deseable ante cambios cíclicos de temperatura.

- e) **Fricción:** Característica primordial para que exista buena adherencia entre los neumáticos (cauchos) de los vehículos y la superficie de rodamiento.
- f) **Trabajabilidad:** Adecuadas propiedades para su colocación y compactación.

2.3 Definición de términos básicos

Aditivos: Son componentes de naturaleza orgánica (resinas) o inorgánica, cuya inclusión tiene como objeto modificar las propiedades físicas de los materiales conglomerados en estado fresco. Se suelen presentar en forma de polvo o de líquido, como emulsiones.

Aglomerante: Los aglomerantes son materiales capaces de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por métodos exclusivamente físicos.

Agregado: También denominados áridos. Son una colección de partículas de diversos tamaños que se pueden encontrar en la naturaleza, ya sea en forma de finos, arenas y gravas o como resultado de la trituración de rocas.

Betún: Es una clase de sustancia compuesta principalmente de hidrocarburos de alto peso molecular, de color oscuro sólida, semisólida o viscosa; natural o fabricada, en la cual son típicos los asfaltos y alquitranes.

Cementante: Cualquier producto que tenga la capacidad de unir piezas entre sí mismas, por ejemplo, el cemento portland, el asfalto, las resinas, etc.

Escarificar: Remover el material de la carpeta asfáltica con un rastrillo o máquina especializada, con la finalidad de adaptar la superficie para una restauración o rehabilitación de la carpeta asfáltica.

Firme: El firme, también conocido como carpeta o superficie de rodamiento, es el material superficial permanente que sostiene el tráfico peatonal y vehicular de una vía o camino. En el pasado se usaban guijarros y adoquines, pero estos quedaron reemplazados por asfalto y hormigón, que permiten un paso más cómodo y una puesta más económica, dejando los adoquines para lugares históricos.

Granulometría: Consiste en pasar la muestra de agregados por una serie de tamices, cada uno de los cuales tienen aberturas de un tamaño específico. Los tamices están denominados de acuerdo al tamaño de sus aberturas. Las partículas gruesas quedan atrapadas en los tamices superiores; las partículas de tamaño medio pasan a través de los tamices medianos, y las partículas finas pasan a través de los tamices inferiores.

Pétreo: Que es de piedra, Que tiene la dureza, textura u otra característica propia de la piedra.

Termoplástico: Un termoplástico es un plástico que, a temperaturas relativamente altas, se vuelve deformable o flexible, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente. La mayor parte de los termoplásticos son polímeros de alto peso molecular, los cuales poseen cadenas asociadas por medio de fuerzas de Van der Waals débiles; fuertes interacciones dipolo-dipolo y enlace de hidrógeno, o incluso anillos aromáticos apilados. Los polímeros termoplásticos difieren de los polímeros termoestables o termo-fijos en que después de calentarse y moldearse pueden recalentarse y formar otros objetos.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de Investigación

El presente trabajo de investigación busca evaluar las propiedades físico-mecánicas por el método Marshall de mezclas asfálticas con la incorporación de material producto del escarificado de pavimentos con porcentajes de participación por arriba del 30% del peso total del agregado, por lo tanto se define con una investigación de tipo experimental, que según (Arias, 2006, p.33) “es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos a determinadas condiciones, estímulos o tratamientos (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente)”.

3.2. Nivel de la Investigación

La investigación está basada en el análisis de las propiedades Marshall de mezclas asfálticas diseñadas con la incorporación de material reciclado de carpetas asfálticas, por lo tanto el estudio se asienta en la investigación descriptiva, que según (Arias, 2006, p. 24) “consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento”.

3.3. Diseño de la Investigación

El presente trabajo adopta un diseño de investigación de campo que, (Mijares y García, 2007, p. 4) define como:

El análisis sistemático de problemas en la realidad, con el propósito bien sea de describirlos, interpretarlos, entender su naturaleza y factores constituyentes, explicar sus causas y efectos, o predecir su ocurrencia, haciendo uso de métodos o enfoques de investigación conocidos o en desarrollo.

En este sentido, esta investigación se basó en la realización de ensayos de laboratorio donde se controlaron y evaluaron las variables que influyen en el diseño de las mezclas y las propiedades definitivas de las mismas.

3.4. Población y Muestra

La población está conformada por todas las mezclas asfálticas en caliente diseñadas por el método Marshall con la incorporación de material producto del escarificado con porcentajes de participación de treinta y cinco por ciento del peso total del agregado que se produzcan a nivel nacional.

La muestra está constituida por todas las mezclas asfálticas en caliente con incorporación de material producto del escarificado con porcentajes de participación de treinta y cinco por ciento del peso total del agregado, producida con agregado pétreo proveniente de la quebrada Botucal, municipio Jiménez, Estado Lara, material recuperado de la escarificación de la carpeta asfáltica de la autopista circunvalación norte, ubicada en Barquisimeto, estado Lara, y cemento asfáltico A-20.

3.5. Técnica e Instrumento de Recolección de Datos

Dada la naturaleza de esta investigación, la técnica que se utilizará es la observación directa, que para (Hernández, Fernández y Baptista, 1991, p. 348) “consiste en el registro sistemático, válido y confiable de comportamientos o conducta manifiesta”.

Se empleará como instrumento de recolección de datos la libreta de campo, además también se utilizarán archivos electrónicos, como trabajos estudiantiles, normas, libros científicos referentes al tema de reciclaje, asfalto, granulometría, materiales y ensayos.

3.6. Fases Metodológicas

Fase I. Caracterizar el material escarificado.

Mediante el método del cuarteo se reducirá la muestra hasta obtener la cantidad requerida para realizarle los ensayos granulométricos y de extracción a los desechos asfálticos en estado original. Los ensayos que se realizarán para la caracterización de este agregado son:

- Granulometría del material proveniente de la escarificación en su estado original y después de la extracción del cemento asfáltico. Método ASTM C136.
- Determinación del contenido de ligante asfáltico. Método FLNV-MVA-09

Fase II. Determinar propiedades del cemento asfáltico.

Se le realizarán ensayos al cemento asfáltico para determinar si posee las propiedades indicadas en la norma venezolana COVENIN 1670:1995. Los ensayos que se realizaran para la caracterizar del cemento asfáltico son los siguientes:

- Penetración. Método COVENIN 1105
- Peso específico. Método COVENIN 1286-83
- Punto de ablandamiento. Método del anillo y bola. Método COVENIN 419
- Ductilidad. Método COVENIN 1123
- Viscosidad absoluta. Método AASTHO T202
- Durabilidad o ensayo para determinar el grado de envejecimiento de cementos asfálticos en estufa de película delgada. Método COVENIN 2046-92.
- Punto de inflamación. Método COVENIN 372.

Fase III. Definir características del agregado pétreo.

Para la caracterización del agregado mineral utilizado en la mezcla se extraerán muestras representativas de las pilas de almacenamiento de la planta trituradora de piedra picada $3/4''$, arrocillo-polvillo y arena lavada. Para luego en el laboratorio reducir las muestras mediante el método del cuarteo manual (COVENIN 270:1988) y con ayuda de la cuarteadora mecánica, hasta obtener la cantidad necesaria para la realización de los siguientes ensayos:

- Granulometría de los agregados
- Peso Específico.

- Caras producidas por fractura. Método ASTM D5821-95 y COVENIN 1124.
- Partículas planas y alargadas. Método ASTM D4791-99
- Porcentaje de desgaste según el ensayo Los Ángeles. ASTM C131-C535.
- Ensayo equivalente de arena. Método ASTM D2419

Fase IV. Diseñar mezclas asfálticas con incorporación de material producto de la escarificación con participación de 35 % del peso del agregado.

El diseño de la mezcla responde a la metodología Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente. Para la cual se determinará una combinación de diseño partiendo de que el material asfáltico recuperado es un agregado más y su participación en la mezcla es de 35% del peso total del agregado, para así elaborar una serie briquetas con diferentes porcentajes de asfalto que permitirán encontrar el porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla.

Fase V. Evaluar las propiedades Marshall de la mezcla asfáltica diseñada con la incorporación de material producto de la escarificación.

Una vez producidas las briquetas con el fin de determinar sus propiedades físico – mecánicas de la mezcla y encontrado el porcentaje óptimo de cemento asfáltico se procederá a realizar la mezcla con dicho porcentaje para así evaluar sus propiedades y determinar si cumple con las características mecánicas que debe poseer una mezcla tipo M-12.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente trabajo de investigación se fundamenta en la Norma NTF 2000-1:2009 que en su capítulo (12-10) establece los requisitos para la producción, construcción y medición de Mezclas de Concreto Asfáltico en Caliente densamente gradadas compuestas por agregados y cemento asfáltico. Este documento normativo incluye cuatro tipos de mezclas de concreto asfáltico, distinguidas en función de su tamaño nominal máximo las cuales se identifican como mezclas tipo M-25, M-19, M-12 y M-9. En base a esto se diseñó una mezcla densa para bajo tránsito vehicular tipo M-12 con incorporación de mezcla asfáltica recuperada producto de la escarificación con participación del 35% del peso total del agregado cuestionando lo establecido en dicha norma que estipula un 30% del total del peso del agregado como porcentaje máximo de participación.

Es de gran importancia al diseñar este tipo de mezclas asfálticas que incluyen un agregado no convencional como lo es la Mezcla Asfáltica Recuperada, por sus siglas (MAR), tomar en cuenta que se deben conocer datos sobre las características de estos agregados, en esta caso, datos acerca de la carpeta asfáltica escarificada, como el tipo de mezcla, si han existido trabajos de recuperación y datos sobre dichos trabajos, tiempo que lleva extendida la carpeta y posibilidad de que existan capas con diferentes tipos de mezclas, ya que estos datos ayudaran a la caracterización efectiva de dicho MAR. A los propósitos de esta investigación no se pudieron obtener dichos datos debido a que no existen datos registrados de la composición de las carpetas asfálticas de la zona donde se ejecutó la escarificación.

Puesto a que la escarificación de carpetas asfálticas es un proceso mecánico que depende del estado de las maquinas que lo realizan, también es de gran importancia conocer las características de la maquinaria y el estado en que se encuentra. Para este

trabajo de investigación se utilizó material proveniente del escarificado en una vía urbana ubicada en el sector El Garabatal, Municipio Iribarren, Estado Lara, con una maquina fresadora Wirtgen modelo 2000DC, con un ancho de calzada de 2,10 metros, a una profundidad de 8 cm, con las picas nuevas (Ver Figura 1.), por lo que se obtuvo material homogéneo de buena gradación y con una granulometría consistente.



Figura 1. Picas de máquina escarificadora (fresadora)

Los agregados minerales proceden de la quebrada Botucal, ubicada en el municipio Jiménez del estado Lara, dicho agregado es transportado hasta una planta trituradora ubicada en San José de Quíbor, estado Lara, para su proceso, obteniendo como producto cuatro agregados: Piedra Picada < 1”, Piedra Picada < 3/4”, Arrocillo-Polvillo y Arena Lavada.

Para el diseño de la mezcla objeto de la presente investigación se hizo uso del método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente, que previamente requiere que tanto los agregados pétreos como el cemento asfáltico cumpla con las especificaciones de calidad establecidas en la normas usada.

Para garantizar la calidad de los agregados, se caracterizaron los agregados minerales, la Mezcla Asfáltica Recuperada y el cemento asfáltico para determinar sus propiedades.

Para alcanzar el objetivo de esta investigación es necesario realizar una serie de ensayos y métodos de estudio de mezclas, cuyos resultados se plasman a continuación.

4.1. Caracterizar el material escarificado.

4.1.1. Granulometría en estado original y después de la extracción. Método ASTM C136

Mediante el método del cuarteo manual descrito en la norma COVENIN 270:1988, se redujo la muestra hasta obtener varias porciones representativas a las cuales se les realizaron los ensayos donde se determinó la granulometría de los desechos asfálticos en estado original, siguiendo el procedimiento del método ASTM C-136. Se realizó la granulometría antes y después de ser extraído el cemento asfáltico considerando lo estipulado en la norma ASTM D-5455, y se arrojaron los resultados presentados a continuación, (Ver Tabla 1):

Tabla 1. Granulometría promedio de la Mezcla Asfáltica Recuperada en estado original y después de la extracción

Granulometría promedio de la M.A.R. en estado original.								
MAR	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,74 mm	2,36 mm	1.18 mm	0,30mm	0,074mm
	3/4"	1/2 "	3/8"	# 4	# 8	# 16	# 50	# 200
Antes	100	95.814	90.260	74.932	51.702	30.834	7.818	4.024
Después	99.2	96.1	94.0	84.5	71.4	47.8	30.1	17.7

Fuente: Carrasco, Rojas.

4.1.2. Extracción de ligante asfáltico. Método FLNV-MVA-09

Para este ensayo se realizaron dos muestras, las cuales se colocaron en el plato de centrifugado previamente tarado, posteriormente se procedió a añadirle el solvente especificado en el manual llamado xilol, en una cantidad que depende del peso de la muestra (Ver Figura 2), se dejó reposar por alrededor de una hora para luego encender la máquina de centrifugado, dicho proceso se repitió hasta que el líquido saliente de dicha máquina fue de color rojo pajizo (Ver figura 4), según lo descrito en el método FLNV.MVA-09. En total se le agregó 3500 ml de xilol.

Una vez terminado el proceso se recogió una alícuota del asfalto expulsado de 25 ml para obtener la cantidad de cenizas, es decir, los finos que pasaron a través del filtro, dicha alícuota se calentó en la mufla a 600 °C hasta obtener las cenizas.

La cantidad de asfalto de la mezcla se calculó obteniendo la diferencia de pesos entre el inicial, menos el peso de los agregados, el de la ceniza y el peso de lo que retuvo el filtro. Obteniendo como resultado un promedio de 4.64% de cemento asfáltico.



Figura 2. Colocación de xilol en la máquina centrifugadora.



Figura 3. Centrifugadora



Figura 4. Ligante asfáltico extraído del agregado

4.2. Determinar propiedades del cemento asfáltico.

Para el diseño de la mezcla estudiada se utilizó cemento asfáltico tipo A-20 producido por la empresa estatal de petróleo PDVSA en el Centro de Refinación de Paraguaná, Amuay, Estado Falcón.

A este se le realizaron una serie de ensayos que permitieron conocer sus características y propiedades con el fin de evitar variaciones en la mezcla causadas por alteraciones en el Cemento Asfáltico.

4.2.1. Penetración. Método COVENIN 1105. ASTM D-5

La consistencia del cemento asfáltico se determinó mediante el ensayo de penetración descrito en el método COVENIN 1105. ASTM D-5, el cual consistió en medir la distancia en decimas de milímetros que penetra una aguja verticalmente una muestra de asfalto. Para esto a una temperatura de 25 °C se utilizó una aguja de 1.00mm a 1.02 mm de diámetro contenida por el penetrómetro. El Valor obtenido mediante este ensayo se muestra a continuación, (Ver Tabla 2):

Tabla 2. Penetración Original a 25°C

Penetración Original a 25°C 100g 5seg.mm/10	
Ensayo 1	66
Ensayo 2	66
Ensayo 3	66
Ensayo 4	67
Promedio	66

Fuente: Carrasco, Rojas

4.2.2. Peso específico. Método COVENIN 1286-83

Para determinar la densidad del cemento asfáltico, se utilizó el método COVENIN 1286-83. Esto, mediante la utilización de un picnómetro de vidrio, del cual se determinó el peso específico del agua destilada usada para el ensayo y en ese mismo picnómetro se colocó la muestra de cemento asfáltico con el fin de obtener su peso específico el cual es la relación que existe entre el peso de un volumen de cemento asfáltico y el peso de ese mismo volumen de agua a una temperatura de 25 °C. Se muestra a continuación los resultados, (Ver Tabla 3):

Tabla 3. Peso Específico a 25°C

Peso Específico a 25°C	
Peso del Picnómetro (g)	32,24
Peso del Picnómetro + agua (g)	57,82
Peso del Picnómetro + muestra (g)	50,71
Peso del picnómetro + muestra + agua (g)	58,33
Peso Específico a 25°C	1,028

Fuente: Carrasco, Rojas

4.2.3. Punto de ablandamiento. Método del anillo y bola. Método COVENIN 419

El objetivo de este método, es calcular la temperatura en la que ocurre el ablandamiento del cemento asfáltico mediante el uso de una serie de anillos y bolas de acero de diámetro 9.52 mm y peso comprendido entre 3.45g y 3.55g, porta anillo y centradores de bolas.

El punto de ablandamiento es la temperatura a la cual el cemento asfáltico contenido en el anillo en posición horizontal bajo la acción del peso de la bola colocada encima de él es forzada hacia abajo una distancia de 1" o 25.4mm. Esto dentro de un baño de agua o glicerina sometida a un aumento de temperatura constante. Los resultados de este ensayo se pueden apreciar a continuación (Ver Tabla 4):

Tabla 4. Punto de Ablandamiento

Punto de Ablandamiento	
Ensayo 1 (°C)	49
Ensayo 2 (°C)	49
Promedio	49

Fuente: Carrasco, Rojas

4.2.4. Viscosidad absoluta. Método AASTHO T202.

La viscosidad de los cementos asfálticos se determinó con un viscosímetro de tubo capilar, en función del tiempo necesario para inducir por medio de vacío un

volumen fijo de líquido a través de un tubo capilar a una temperatura de 60 °C ya que se asemeja a la temperatura superficial de la carpeta de rodamiento en funcionamiento. Por medio de este ensayo, descrito en el método AASTHO T202 se estableció el tipo de cemento asfáltico con el cual se trabajó. A continuación, se muestran los resultados (Ver Tabla 5):

Tabla 5. Viscosidad Absoluta

Viscosidad Absoluta	
Viscosidad a 60°C y 300 mmHg (poises)	2406

Fuente: Carrasco, Rojas

4.2.5. Ductilidad. Método COVENIN 1123.

Para este ensayo, descrito en el método COVENIN 1123, se utilizaron briquetas de muestra, un ductilometro y un baño de agua el cual debe estar a una temperatura de 25 ± 0.5 °C. El procedimiento consistió en sumergir en agua una briqueta a una velocidad constante de 5 cm por minuto para separar sus dos extremos y medir la distancia que se elonga antes de su ruptura. Los resultados de este ensayo se encuentran plasmados a continuación, (Ver Tabla 6):

Tabla 6. Ductilidad Original

Ductilidad Original	
Ductilidad a 25°C 5cm/min (cm)	>100

Fuente: Carrasco, Rojas

4.2.6. Durabilidad. Método COVENIN 2046-92.

Este ensayo, descrito en el método COVENIN 2046-92, tuvo como objetivo determinar la variación de las propiedades del cemento asfáltico luego de ser sometidos a condiciones extremas de calor y aire que simulan el proceso de fabricación en planta y extendido. Estas condiciones se simularon en un horno rodante (RTFO). El cemento

asfáltico se colocó en un platillo de espesor de 3mm y se introdujo en el horno a una temperatura de 160 °C durante cinco horas, inmediatamente se le realizaron a la muestra ensayos de penetración y viscosidad y los resultados obtenidos se muestran a continuación (Ver Tabla 7):

Tabla 7. Envejecimiento por capa fina (TFOT)

Envejecimiento por capa fina (TFOT) Después del ensayo de película delgada		
Pérdida de masa, %p	< 0,5	0,15
Ductilidad a 25°C (cm)	>20	>20
Reducción de penetración (%)	<50	46,97

Fuente: Carrasco, Rojas

4.2.7. Punto de inflamación. Método COVENIN 372.

Este ensayo, descrito en el método COVENIN 372, se realiza con la finalidad de saber cuál es la temperatura máxima a la que puede ser calentado el cemento asfáltico antes de que se produzca una llama instantánea. A continuación, se muestra el siguiente resultado, (Ver Tabla 8):

Tabla 8. Punto de Inflamación

Punto de Inflamación	
Punto de Inflamación (°C)	262

Fuente: Carrasco, Rojas

4.3. Definir características del agregado pétreo.

Para la caracterización del agregado mineral utilizado en la mezcla se extrajeron muestras representativas de las pilas de almacenamiento de la planta trituradora de piedra picada < 3/4", arrocillo-polvillo y arena lavada. Para luego en el laboratorio reducir las muestras mediante el método del cuarteo manual (COVENIN 270:1988) y

con ayuda de la cuarteadora mecánica, hasta obtener la cantidad necesaria para la realización de los siguientes ensayos.

a) Granulometría de los agregados. Método ASTM C136.

Se determinó la proporción de los diferentes tamaños de partículas que existen en cada uno de los agregados mediante un proceso mecánico llamado granulometría a través de la tamizadora mecánica, según el método ASTM C-136. El promedio de las granulometrías realizadas a cada uno de los agregados se puede apreciar a continuación, (Ver Tabla 9):

Tabla 9. Granulometría de los agregados. Porcentaje pasante.

	25,4 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,74 mm	2,36 mm	1.18 mm	0,30mm	0,074mm
	1"	3/4"	1/2 "	3/8"	# 4	# 8	# 16	# 50	# 200
Arena Lavada.<3/8"	100.0	100.0	100.0	95.6	69.0	51.4	38.5	13.7	3.8
Arrocillo-Polv.<1/2"	100.0	100.0	99.9	97.5	73.2	57.0	45.1	24.2	11.4
P.Picada <3/4"	100.0	100.0	50.5	13.6	4.5	4.3	4.2	3.7	2.2

Fuente: Carrasco, Rojas.

b) Peso Específico.

Como lo indican los métodos COVENIN 268-1988, COVENIN 269-1988, para determinar el peso específico de cada agregado (Piedra Picada < 3/4", Arrocillo-Polvillo y Arena Lavada), cada muestra de cada material obtenido mediante cuarteo se separó en fracciones las cuales se clasificaron según el tamaño de sus partículas (fracción gruesa y fracción fina). Retenido en el tamiz #8, pasante del tamiz #8, retenido en el tamiz #200 y pasante del tamiz #200. A cada muestra se le determino el peso específico bulk, saturado con superficie seca y aparente, esto se aprecia a continuación, (Ver Tabla 10, 11, 12):

Tabla 10. Pesos específicos de la fracción gruesa de los agregados

Peso específico retenido fracción gruesa Ret. #8			
Peso específico	Bulk	S.S.S.	Aparente
pedra < 3/4"	2.516	2.555	2.617
Arrocillo	2.519	2.562	2.631
Arena Lavada	2.462	2.530	2.641

Fuente: Carrasco, Rojas.

Tabla 11. Pesos específicos del pasante del tamiz #8 y retenido en #200.

Peso específico pasante del tamiz #8, ret. #200			
Peso específico	Bulk	S.S.S.	Aparente
Arrocillo	2.531	2.576	2.649
Arena Lavada	2.524	2.582	2.683

Fuente: Carrasco, Rojas.

Tabla 12. Peso específico de la fracción que pasa el tamiz #200.

Peso específico pasante del tamiz #200	
Peso específico	Aparente
Arrocillo	2.643
Arena Lavada	2.672

Fuente: Carrasco, Rojas.

c) Caras producidas por fractura. Método ASTM D5821-95 y COVENIN 1124.

El porcentaje en peso de caras producidas por fractura está determinado por la fracción retenida en el tamiz #4, esta es una característica importante que debe tener la fracción gruesa de los agregados de la Combinación de Diseño ya que esta textura se considera el principal contribuyente en la resistencia de las mezclas a la deformación, llamada estabilidad. Una partícula se considera fracturada si posee más del 25% de su superficie fracturada.

Para el ensayo se obtuvo la muestra mediante el cuarteo manual (COVENIN 270:1988), seguidamente se seleccionó la porción retenida en el tamiz #4 a la cual se le tomo el peso total de la muestra y el de la fracción que cumplió las condiciones de

caras fracturadas según lo descrito en el Método ASTM D5821-95 y COVENIN 1124, (Ver Anexo X). El resultado arrojó que el porcentaje de caras fracturadas fue de 88.2%, cumpliendo con la norma que estipula un porcentaje mínimo de caras producidas por fractura de 60%. (Ver Tabla 13). La fórmula utilizada para la obtención del resultado fue:

$$\%CF = \frac{\text{peso de las caras producidas por fractura}}{\text{peso total de la muestra}} \times 100$$

Tabla 13. Caras Fracturadas

Porcentaje de caras fracturadas.	
Peso de la Tara (g)	314,5
Peso de la Tara + Muestra total (g)	1444,6
Peso de la muestra total (g)	1130,1
Peso de la tara + muestra con caras fracturadas. (g)	1310,8
Peso de la muestra con caras fracturadas (g)	996,3
% De caras producidas por fractuas.	88,2

Fuente: Carrasco, Rojas.

d) Partículas planas y alargadas. Método ASTM D4791-99

Las presencia de partículas planas y alargadas en una mezcla son indeseables ya que al ser sometidas a la manipulación tienden a romperse y a degradarse bajo los efectos de la compactación y el tránsito vehicular, debido a esto la normativa venezolana admite un porcentaje bajo de no más del 10% de presencia en el agregado.

Para este ensayo, descrito en la norma ASTM D4791-99, de la porción de la muestra retenida en el tamiz #4 se tomaron las partículas que cumplían con la condición largo/ancho mayor a 5 medidas con un vernier, seguidamente se tomó el peso y se determinó su porcentaje en la muestra. (Ver anexo). El porcentaje de partículas planas y alargadas fue de 4.74% cumpliendo con lo establecido en la normativa. (Ver Tabla 14). Y se determinó mediante el uso de la siguiente formula:

$$\%pPA = \frac{\text{Peso de particulas planas y alargadas}}{\text{Peso total de la muestra}}$$

Tabla 14. Partículas planas y alargadas

Porcentaje de Partículas planas y alargadas		
Peso total de los agregados (g)		1112,3
Peso de los agregados con caras planas y alargadas (g)		47,10
% De partículas planas y alargadas.	(2/1) * 100	4,23

Fuente: Carrasco, Rojas.

e) Porcentaje de desgaste según el ensayo Los Ángeles. ASTM C131-C535.

Es importante conocer el porcentaje de desgaste que posee la porción gruesa del agregado el cual determina la resistencia a la abrasión, machaqueo e impacto. La norma indica que el porcentaje máximo de desgaste que puede poseer el agregado para mezclas de bajo tránsito vehicular es de 45% en carpetas de rodamiento. Se realizó el ensayo, según el ensayo Los Ángeles. ASTM C131-C535, a una muestra representativa de la porción gruesa de la mezcla obteniendo como resultado un 32.6% cumpliendo así con la condición establecida en la norma. (Ver Tabla 15).

Tabla 15. Desgaste de los Ángeles Piedra < 3/4"

Desgaste de los Ángeles	
Peso inicial (g)	5000,60
Peso final (g)	3370,60
% De desgaste	32,60

Fuente: Carrasco, Rojas.

f) Ensayo equivalente de arena. Método ASTM D2419

Este ensayo, descrito en el método ASTM D2419, (Ver Anexo B-11.), tiene como objetivo determinar la cantidad porcentual de contenido de polvo fino o arcilla perjudicial en el agregado. Es importante ya que garantiza que no exista una cantidad dañina de arcilla o partículas de pequeño tamaño que al estar en presencia de agua

aumentan considerablemente su tamaño y producen tensiones en la mezcla que afectan principalmente su durabilidad. Este ensayo se le realizó a la porción fina del agregado mineral específicamente la que pasa por el tamiz #4, resultando un 72% de arena equivalente cumpliendo así con la norma que establece un valor para tránsito vehicular bajo no menor a 35%. (Ver Tabla 16). Para el cálculo del porcentaje de arena equivalente se hizo uso de la siguiente fórmula:

$$\%E. A. = \frac{\text{lectura de arena}}{\text{lectura de arcilla}} \times 100$$

Tabla 16. Resumen de características del agregado.

Caracterización de los agregados		
Tipo de ensayo	Valor obtenido	Valor normativo
Caras fracturadas	86.60%	>60%
Part. Planas y alargadas	4.23%	<10%
Desgaste de Los Ángeles	35.70%	≤ 45%
Equivalente de Arena	57.60%	≥ 35%

Fuente: Carrasco, Rojas

4.4 Diseñar mezclas asfálticas con incorporación de material producto de la escarificación mayor al 30 % del peso del agregado.

El diseño de la mezcla responde a la metodología Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente. Para la cual se determinó una combinación de diseño partiendo de que el material asfáltico recuperado es un agregado más y su participación en la mezcla fue de 35% del peso total del agregado. Su granulometría se incluyó en la Combinación de Diseño (CD) para la cual se hizo uso de la granulometría en estado original de la mezcla, así como también la de los restantes agregados (Piedra picada <3/4", Arrocillo-polvillo y Arena lavada). Esta CD se situó dentro de los parámetros granulométricos establecidos para la realización de una mezcla asfáltica en caliente

tipo M-12 según los lineamientos de la norma técnica Fondonorma NTF 2000-1:2009.
(Ver tabla 17)

Tabla 17. Combinación de diseño. Mezcla tipo M-12.

Tipo de Mezcla M12		Combinación Granulométrica									
Agregados	% Participación	% Pasante el tamiz de									
		37,5mm	25,4 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,74 mm	2,36 mm	1.18 mm	0,30mm	0,074mm
		1 1/2"	1"	3/4"	1/2 "	3/8"	# 4	# 8	# 16	# 50	# 200
Arena Lavada.<3/8"	20.0%	100.0	100.0	100.0	100.0	95.6	69.0	51.4	38.5	13.7	3.8
Arrocillo-Polv.<1/2"	35.0%	100.0	100.0	100.0	99.9	97.5	73.2	57.0	45.1	24.2	11.4
P.Picada <3/4"	10.0%	100.0	100.0	100.0	50.5	13.6	4.5	4.3	4.2	3.7	2.2
MAR	35.0%	100.0	100.0	100.0	95.8	90.3	74.9	51.7	30.8	7.8	4.0
Combinación	100%	100.0	100.0	100.0	93.5	86.2	66.1	48.7	34.7	14.3	6.4
Límite superior		100.0	100	100	100	90	74	58	37	21	10
Límite inferior		100.0	100	100	90	56	44	28	15	5	2

Fuente: Carrasco, Rojas.

Con el conocimiento de las cantidades porcentuales de participación de los agregados que deben mezclarse plasmados en la CD, se procedió a la elaboración de briquetas o especímenes de estudio en concordancia con el método Marshall para el diseño de pavimentos en caliente. Para ello partimos de un porcentaje medio de cemento asfáltico de 4% y se varió 0.5%, 3 veces por encima y por debajo, es decir las briquetas variaron desde 2.5% hasta 5.5%. Para cada contenido de cemento asfáltico se realizaron 3 briquetas, cada una de ellas con un peso aproximado de 1200g.

El peso total del agregado contenido en cada briqueta se determinó restándole al peso total de la briqueta el peso del cemento asfáltico que es el resultado de multiplicar su porcentaje de participación por el peso de cada briqueta. Seguidamente se multiplicó el peso total de los agregados por el porcentaje de participación de cada uno de los agregados para conocer el peso que debe mezclarse cada agregado en las briquetas para cada porcentaje de cemento asfáltico ensayado. (Ver tabla 18).

Tabla 18. Peso del agregado para cada briqueta en función del contenido de C.A.

Peso del agregado para cada briqueta en función del porcentaje de C.A. peso briqueta = 1200g								
% C.A.	Peso C.A.	% agregados	Peso del Agr.	P.p <3/4" 10%	Arrocillo 35%	Arena Lavada 20%	M.A.R. 35%	total
2.5	30	97.5	1170	117	409.5	234	409.5	1170
3	36	97	1164	116.4	407.4	232.8	407.4	1164
3.5	42	96.5	1158	115.8	405.3	231.6	405.3	1158
4	48	96	1152	115.2	403.2	230.4	403.2	1152
4.5	54	95.5	1146	114.6	401.1	229.2	401.1	1146
5	60	95	1140	114	399	228	399	1140
5.5	66	94.5	1134	113.4	396.9	226.8	396.9	1134

Fuente: Carrasco, Rojas.

Ya obtenidos los pesos de cada agregado y del ligante asfáltico para cada porcentaje de cemento asfáltico se procedió a determinar la cantidad que queda retenida

en cada tamiz encontrando el porcentaje retenido parcial en cada uno de ellos a través de la granulometría de los agregados (Método ASTM C136), y multiplicándolo por el peso total del agregado para cada porcentaje de asfalto y para cada uno de los agregados. Esto debido a que al momento de la mezcla se toman dichas cantidades de cada tamiz para asegurar que la mezcla producida en laboratorio cumpla con la combinación granulométrica elegida y plasmada en la combinación de diseño y evita que al tomar la cantidad necesaria de cada material no se substraigan más finos que gruesos o viceversa que al ser ensayados puedan arrojar datos discordantes. Dichos datos están expresados en las siguientes tablas. (Ver tablas 19, 20, 21 y 22).

Tabla 19. Peso retenido en tamices de la Arena Lavada para cada porcentaje de C.A.

Tamiz	%pasante	%pasante parcial	%ret. Parcial	contenido de cemento asfáltico %						
				2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
1"	100.0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
3/4"	100.0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
1/2"	100.0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
3/8"	95.6	19.12	0.88	10.31	10.26	10.21	10.15	10.10	10.05	9.99
#4	69.0	13.79	5.33	62.30	61.98	61.66	61.34	61.03	60.71	60.39
#8	51.4	10.27	3.52	41.22	41.01	40.80	40.59	40.38	40.17	39.96
Pasante #8			10.27	120.16	119.55	118.93	118.31	117.70	117.08	116.46

Fuente: Carrasco, Rojas.

Tabla 20. Peso retenido en tamices del Arrocillo-Polvillo para cada porcentaje de C.A.

tamiz	%pasante	%pasante parcial	%ret. Parcial	contenido de cemento asfáltico %						
				2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
1"	100.0	35	0	0	0	0	0	0	0	0
3/4"	100.0	35	0	0	0	0	0	0	0	0
1/2"	99.9	34.95	0.05	0.61	0.61	0.60	0.60	0.60	0.60	0.59
3/8"	97.5	34.12	0.83	9.73	9.68	9.63	9.58	9.53	9.48	9.43
#4	73.2	25.64	8.48	99.23	98.72	98.21	97.70	97.19	96.68	96.17
#8	57.0	19.95	5.69	66.56	66.22	65.88	65.54	65.20	64.86	64.52
Pasante #8			19.95	233.37	232.17	230.97	229.78	228.58	227.38	226.19

Fuente: Carrasco, Rojas.

Tabla 21. Peso retenido en tamices de la Piedra picada < ¾” en función del C.A.

tamiz	%pasante	%pasante parcial	%ret. Parcial	contenido de cemento asfáltico %						
				2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
1"	100.0	10	0	0	0	0	0	0	0	0
¾"	100.0	10	0	0	0	0	0	0	0	0
1/2"	50.5	5.05	4.95	57.97	57.67	57.37	57.08	56.78	56.48	56.18
3/8"	13.6	1.36	3.68	43.07	42.85	42.63	42.41	42.19	41.97	41.74
#4	4.5	0.45	0.91	10.64	10.59	10.53	10.48	10.43	10.37	10.32
#8	4.3	0.43	0.03	0.31	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Pasante #8			0.43	5.01	4.99	4.96	4.94	4.91	4.88	4.86

Fuente: Carrasco, Rojas.

Tabla 22. Peso retenido en tamices del M.A.R. para cada porcentaje de C.A.

tamiz	%pasante	%pasante parcial	%ret. Parcial	contenido de cemento asfáltico %						
				2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
1"	100.0	35	0	0	0	0	0	0	0	0
¾"	100.0	35	0	0	0	0	0	0	0	0
1/2"	95.8	33.53	1.47	17.14	17.05	16.96	16.88	16.79	16.70	16.61
3/8"	90.3	31.59	1.94	22.75	22.63	22.51	22.40	0.00	22.16	22.05
#4	74.9	26.23	5.36	62.77	62.45	62.12	61.80	61.48	61.16	60.84
#8	51.7	18.10	8.13	95.13	94.64	94.15	93.66	93.18	92.69	92.20
Pasante #8			18.10	211.72	210.63	209.55	208.46	207.38	206.29	205.20

Fuente: Carrasco, Rojas.

Una vez calculados los pesos retenidos en todos los tamices se procedió a realizar las pesadas como se puede observar en la Figura 5. Dichas pesadas se colocaron en envases metálicos los cuales introdujeron en el horno a 160 °C durante al menos 3 horas hasta que lograran mantener su temperatura (Ver figura 6) con la excepción de la Mezcla Asfáltica Recuperada que se dejó afuera mientras se calentaban los agregados pétreos, junto a las pesadas se colocó también en el horno el cemento asfáltico.



Figura 5. Pesada de agregados para la combinación con 3% de C.A



Figura 6. Pesadas en el horno (160°C)

Verificada la temperatura se procedió a la mezcla de los agregados junto con el cemento asfáltico en las proporciones indicadas según el contenido asfáltico de cada briqueta verificando la temperatura de mezclado y el tiempo, hasta que la mezcla consiguiera un aspecto homogéneo. (Ver Figura 7).



Figura 7. Agregados antes de mezclarse
Con el Cemento Asfáltico.



Figura 8. Agregados después de haberse
Mezclado a temperatura previa
Compactación.

Culminado el proceso de mezclado se llevó a cabo el proceso de compactación para el cual se le tuvo cuidadoso seguimiento a la temperatura que al momento de la compactación debía ser de 150 °C (Ver Figura 8). Para ello se vació la mezcla en los moldes y se le propiciaron 50 golpes por cada cara con el martillo Marshall (Fotografía 9) tal cual es especificado para mezclas de bajo tránsito vehicular en la norma usada.



Fotografía 9. Martillo Marshall.

4.4.1. Densidad de las briquetas.

Luego que las briquetas han sido moldeadas y compactadas se dejaron enfriar durante 24 horas y se extrajeron del molde (Ver figura 10). Posteriormente se pesaron al aire, sumergidas, y nuevamente al aire después de secarlas superficialmente al ser sacadas del agua de la balanza hidrostática (peso saturado con superficie seca)(Ver Figura 11 y 12). Obtenidos dichos datos se procedió a determinar su volumen y su densidad (G_{mb}), mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$G_{mb} = \frac{P_d}{V}$$

Donde:

G_{mb} =Densidad de la briqueta (g/cm^3)

P_d = Peso Seco de la briqueta (g)

V = Volumen de la briqueta



Figura 10. Extracción de la briquetta del molde.



Figura 11. Pesada de briquetta seca.



Figura 12. Pesada de briquetta sumergida.

4.4.2. Estabilidad y Flujo.

Seguidamente luego de determinar las densidades de las briquetas se partió a realizarles el ensayo de estabilidad y flujo. Para dicho ensayo fue necesario introducir las briquetas en agua durante 30 minutos a una temperatura constante de 60 °C con el objetivo de simular las condiciones más desfavorables de lluvias y altas temperaturas a las que se puede someter un pavimento en operatividad. (Ver Figura 13, 14)



Figura 13. Briquetas sumergidas en agua.



Figura 14. “Baño de agua María”

Una vez cumplido los 30 minutos se procedió realizar la rotura de las briquetas mediante la prensa Marshall (Ver figura 15). Esta prensa da lecturas de estabilidad y flujo, teniendo en cuenta que la estabilidad es la máxima carga axial aplicada al momento de la rotura de la briqueta y se lee en libras, y el flujo la deformación diametral de la briqueta al ser expuesta a la máxima carga axial, este se lee en centésimas de pulgadas.



Figura 15. Rotura de las briquetas.

El valor de estabilidad obtenido fue corregido por un factor que depende del volumen real de la briqueta calculado anteriormente y otro valor que depende de la calibración del aparato. Este factor de corrección se aplica para hacer el valor obtenido igual al valor que se hubiese obtenido de una briqueta de volumen igual al estándar del método Marshall de una altura de 6.35 cm. La ecuación resultante para la estabilidad corregida es:

$$E_{\text{corregida}} = \text{Lectura} * \text{Constante del anillo} * \text{Factor de correccion}$$

Ya que para cada porcentaje de cemento asfáltico se realizaron tres briquetas los valores obtenidos fueron promediados como se puede apreciar en el anexo.

4.4.3. Análisis de la densidad y vacíos.

Para el análisis de densidad y vacíos fue necesario conocer el peso específico del cemento asfáltico, el peso específico del material combinado, el peso específico máximo teórico de la mezcla.

4.4.3.1 Peso específico del material combinado.

El peso específico masivo del conjunto de agregados se obtuvo con el conocimiento de los pesos específicos de cada uno de los agregados y sus granulometrías, con el fin de completar la siguiente expresión:

$$PE_{\text{agregado}} = \frac{\%ret.\#8 + \%Pas.\#8ret\#200 + \%Pasnt.\#200}{\frac{\%ret.\#8}{PE.ret\#8} + \frac{\%Pas.\#8ret\#200}{PE.Pas.\#8ret\#200} + \frac{\%Pasnt.\#200}{PE.Pasnt.\#200}}$$

Donde:

PE_{agregado} = Peso específico promedio del agregado

%Ret.#8 = Porcentaje de retenido en el tamiz #8

%Pas.#8 Ret.#200 = Porcentaje del pasante del tamiz #8 y retenido en el tamiz #200

%Pasnt.#200 = Porcentaje del pasante del tamiz #200

PE Ret.#8 = Peso específico del Retenido en el tamiz #8

PE P.#8 Ret.#200 = Peso específico del Pasante tamiz #8 Retenido en el tamiz #200

PE P.#200 = Peso específico del Pasante del tamiz #200.

De esta manera se obtuvieron los pesos específicos promedio de cada uno de los cuatro agregados de la combinación de diseño plasmados en la tabla.

El peso específico masivo se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$PE_{masivo} = \frac{\%Piedra.P. < 3/4" + \%arrocillo + \%Arena + \%M.A.R.}{\frac{\%Piedra.P. < 3/4"}{PE.Piedra.P. < 3/4"} + \frac{\%arrocillo}{PE.arrocillo} + \frac{\%Arena}{PE.Arena} + \frac{\%M.A.R.}{PE.M.A.R.}}$$

Donde:

PEmasivo. = Peso específico masivo promedio del agregado

%Piedra. P. <3/4" = Porcentaje de Piedra picada <3/4" en la Combinación

%Arrocillo = Porcentaje de Arrocillo Polvillo en la Combinación

%Arena = Porcentaje de Arena Cernida en la Combinación

%M.A.R. = Porcentaje de la Mezcla Asfáltica Recuperada en la Combinación

PE Piedra <3/4" = Peso específico de la Piedra picada <3/4"

PE Arrocillo = Peso específico del Arrocillo-Polvillo.

PE Arena = Peso específico de la Arena Lavada.

PE M.A.R. = Peso específico de la Mezcla Asfáltica Recuperada.

De esta manera se calcularon los pesos específicos masivos bulk y aparente de la combinación de agregados.

4.4.3.2 Gravedad específica máxima de la mezcla

Para determinar la gravedad específica máxima de la mezcla sin compactar se le realizó a la mezcla con 4% de cemento asfáltico el Ensayo Rice (ASTM D-2041), ensayo que consistió en sumergir la mezcla en un frasco con agua y aplicarle vacío para extraerle el aire, y así determinar el volumen de agregado mineral y asfalto sin tomar en cuenta los vacíos llenados por aire (Ver Figura 16). Una vez conocido el peso específico máximo teórico de la mezcla se pudo conocer a través de la siguiente expresión el peso específico efectivo de los agregados:

$$PE_{efect} = \frac{100 - \%CA}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{\%CA}{G_{ca}}}$$

Donde:

PEefect = Peso específico efectivo de los agregados en combinación.

%CA = % de Cemento Asfáltico (4%)

Gmm = Densidad RICE para 4% de cemento asfáltico.

Gca = Peso específico cemento asfáltico.



Figura 16. Ensayo RICE

4.4.3.3 Gravedad específica máxima teórica

Para determinar la gravedad específica máxima teórica de la mezcla para cada contenido de asfalto fue usada la siguiente ecuación:

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{\%agregado}{PE.efect.} + \frac{\%CA}{PE.ca}}$$

Donde:

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima.

%agregado = porcentaje de agregado mineral que participa.

PE.efect. = Peso específico efectivo del agregado mineral en combinación

%CA = Porcentaje de cemento asfáltico.

PE.ca = Peso específico del cemento asfáltico.

4.4.3.4 Vacíos totales de la mezcla

Estos datos sirvieron para conseguir los Vacíos Totales de la mezcla (espacios ocupados por aire en las partículas de agregado mineral, cubiertas por cemento asfáltico), los Vacíos del Agregado Mineral “VAM”, que no son más que los espacios que no están siendo ocupados por las partículas de agregado mineral en la mezcla compactada si no por aire y cemento asfáltico. Y los Vacíos Llenados de asfalto que son la fracción de los VAM que realmente son ocupados por el cemento asfáltico.

$$VT = \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \times 100$$

$$VAM = 100 - \frac{Gmb \times \%agregado}{Gsb}$$

$$VII = \frac{VAM - VT}{VAM} \times 100$$

Donde:

VT = Vacíos Totales

VAM= Vacíos del agregado mineral

VII = Vacíos llenados por ligante asfáltico

Gmm= Densidad máxima teórica de la mezcla

Gmb = densidad real de la briqueta

%agregado = Porcentaje del agregado en la mezcla

Gsb = Peso específico bulk de la mezcla.

De esta manera se encontraron los valores de las curvas de las propiedades Marshall y se procedió a graficarlas para encontrar el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla diseñada. (Ver gráficos 1, 2, 3, 4, 5 y 6).

4.4.4 Curvas de Diseño.

Para la construcción de ellas, se hizo un promedio del máximo valor de la curva Estabilidad Vs. Cemento asfáltico, Densidad Vs Cemento asfáltico y en la curva de Vacíos totales Vs. Cemento Asfáltico en la cual se seleccionó 4% de vacíos totales y se encontró el valor de cemento asfáltico. El porcentaje óptimo para la mezcla el cual resulto ser de 4.4% de cemento asfáltico.

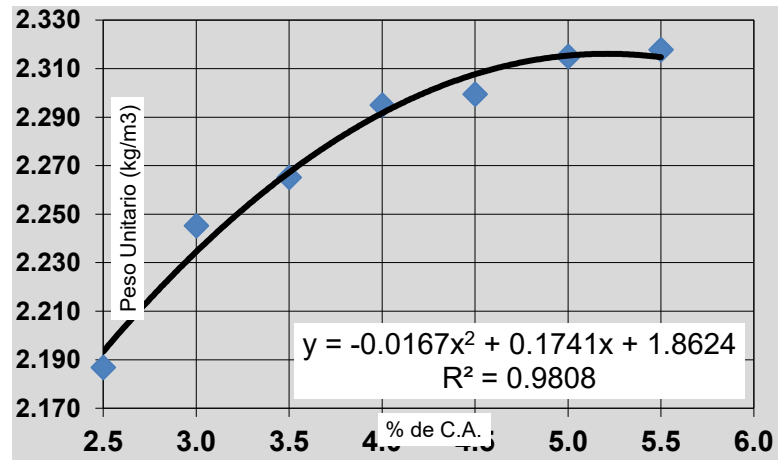


Gráfico 1. Peso unitario Vs. Porcentaje Cemento Asfáltico

Se puede apreciar el peso unitario de la mezcla aumenta conforme es mayor el porcentaje de cemento asfáltico, hasta un punto máximo, donde comienza a disminuir su densidad.

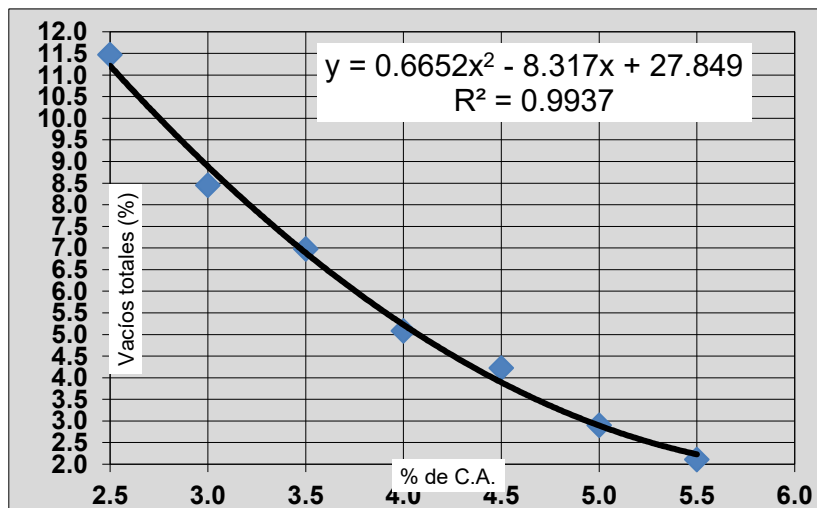


Gráfico 2. Vacíos totales Vs. Porcentaje Cemento Asfáltico

El espacio ocupado por aire en las partículas de agregado mineral cubiertas por cemento asfáltico disminuye a medida que el porcentaje de cemento asfáltico es mayor por lo que se obtuvo una tendencia a la disminución de los vacíos totales.

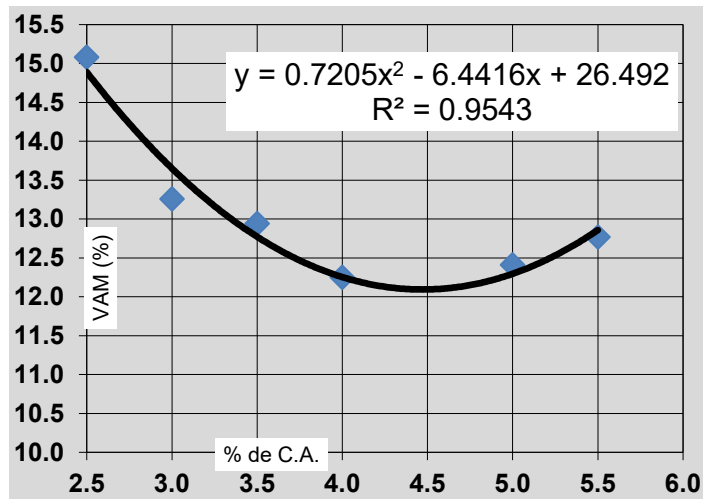


Gráfico 3. Vacíos Agregado Mineral Vs. Porcentaje Cemento Asfáltico

El comportamiento de esta curva fue el comportamiento estándar que tienen los VAM en mezclas convencionales. A medida que se aumenta el cemento asfáltico el valor de los VAM decrece hasta llegar a un mínimo donde comienza a aumentar.

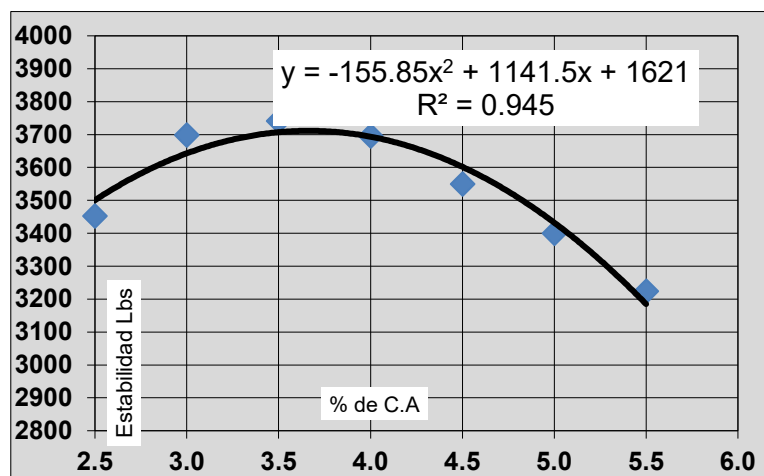


Gráfico 4. Estabilidad (Lbs) Vs. Porcentaje Cemento Asfáltico

Como se puede apreciar la curva de estabilidad tiene un comportamiento típico, a medida que se aumenta el porcentaje de cemento asfáltico la estabilidad aumenta hasta llegar a un punto máximo donde comienza a decrecer.

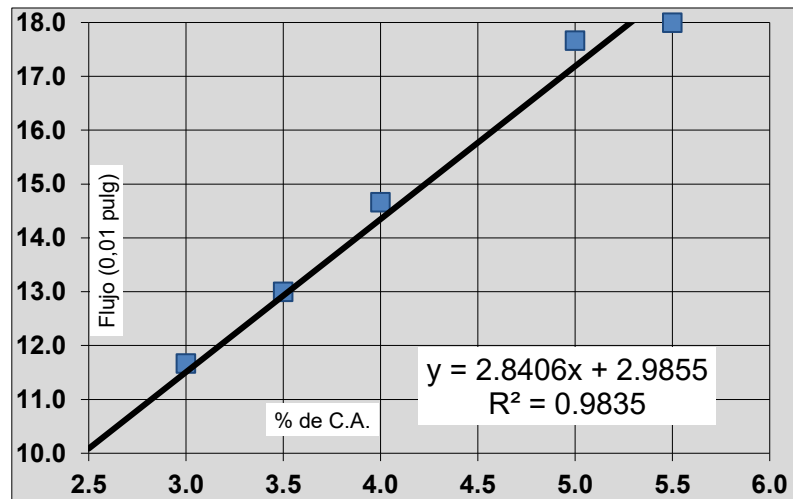


Gráfico 5. Flujo Vs. Porcentaje Cemento Asfáltico

El flujo tiene un comportamiento lineal ascendente, mediante aumenta el cemento asfáltico en la mezcla se hace más deformable la misma, aumentado su flujo.

4.5. Evaluar las propiedades Marshall de la mezcla asfáltica diseñada con la incorporación de material producto de la escarificación con 35% del peso total del agregado.

Con la elaboración de las gráficas y la obtención del porcentaje óptimo de cemento asfáltico el cual dio como resultado 4.4%, se procedió a la elaboración en laboratorio de 3 briquetas de la mezcla diseñada con dicho porcentaje óptimo. Mezcla a la cual se le realizaron todos los ensayos antes repasados (Compactación, densidad, estabilidad y flujo), además se le realizó el ensayo RICE y una extracción de cemento asfáltico para analizar cuál es el verdadero porcentaje de cemento asfáltico que participa en la mezcla debido a que la mezcla asfáltica recupera aporta un porcentaje

de ligante envejecido que debe ser determinado. Los resultados de dichos ensayos se exponen a continuación, (Ver Tabla 23)

Tabla 23. Propiedades Marshall de la mezcla con porcentaje óptimo de C.A.

Propiedad	unidad	valor	criterio normativo
Peso unitario	kg/m ³	2.306	No aplica
Estabilidad	lbs	3,696	>=1600
Flujo	0.01"	14.0	8 - 16
Vacíos totales	%	3.95	3 - 5
Vacíos llenados	%	67.6	65-78
VAM	%	12.20	>14

Fuente: Carrasco, Rojas

Como se puede apreciar en la tabla anterior los valores obtenidos mediante el ensayo y de las ecuaciones de ajuste de las propiedades Marshall, cumplen con los rangos establecidos en la norma técnica Fondonorma NTF 2000-1:2009. Y están muy aproximados a los valores esperados en las gráficas de cada una de las propiedades, con la excepción de los vacíos en el agregado mineral (VAM), los cuales no cumplieron con el rango normativo.

Para una mezcla tipo M-12 de bajo tránsito vehicular con un contenido de vacíos totales de 4%, los VAM según la norma no deben ser menores a 14%, valor que está por encima del obtenido el cual fue 12.2%. Los autores consideran que dicho valor no cumple debido a que se trabajó con material asfáltico recuperado, el cual ya posee cemento asfáltico adherido a sus partículas, condición que puede causar que el porcentaje de vacíos en el agregado mineral sea menor al normalizado pues dicho material representa el 35% de los agregados.

A demás se le realizó una extracción de cemento asfáltico a dos de las briquetas con el fin de obtener la cantidad de cemento asfáltico real que participa en la mezcla debido al aporte del MAR, el cual fue de 6.19%. (Ver Anexo D-14)

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El material proveniente de la escarificación, posee una granulometría que varió antes y después de realizársele el ensayo de extracción de ligante asfáltico. A través de esto, se evidencia que una vez extraído el ligante de la muestra, la granulometría se vuelve más fina, debido a que el cemento asfáltico forma, en conjunto con los agregados minerales conglomerados. Se evidenció además que el cemento asfáltico contenido en este material, aporta en la mezcla cemento asfáltico adicional al porcentaje óptimo determinado mediante las curvas de diseño obtenidas mediante el Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente. Es importante destacar que la evaluación de la mezcla diseñada se realizó considerando una mezcla convencional de agregados vírgenes, debido a que la norma técnica Fondonorma (NTF 2000-1:2009) no posee especificación alguna para el diseño de mezclas con la incorporación de material escarificado.

Los ensayos realizados al cemento asfáltico arrojaron que es de tipo A-20, cuyas propiedades se encuentran entre los límites establecidos en la norma técnica Fondonorma (NTF 2000-1:2009) y es adecuada para la realización de mezclas para carpetas asfálticas.

Los agregados minerales provenientes de la quebrada Botucal, ubicada en el municipio Jiménez, Edo. Lara, tras haber sufrido el proceso de trituración y separación de acuerdo al tamaño, resultó tener bajo contenido de arcillas, bajo porcentaje de partículas planas y alargadas, gran presencia de caras fracturadas y un bajo desgaste del material grueso, lo que lo convierte en un agregado adecuado para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente para cualquier tipo de tránsito según lo estipulado en la norma técnica Fondonorma (NTF 2000-1:2009).

Se diseñó una mezcla asfáltica tipo M-12 para tránsito bajo, según lo estipulado en la norma técnica Fondonorma (NTF 2000-1:2009) con incorporación del 35% del peso total de los agregados de material producto de la escarificación. El porcentaje óptimo de cemento asfáltico fue de 4,4% y posteriormente tras realizar los ensayos de extracción se apreció un porcentaje de ligante de 6.19%. Esta diferencia de 6.19% aumentado, se debe al aporte mencionado anteriormente del material producto de la escarificación. Esto significaría entonces, una disminución de nuevo cemento asfáltico.

La mezcla asfáltica diseñada, producida y evaluada tiene propiedades Marshall que se encuentran entre los límites especificados en la norma técnica Fondonorma NTF 2000-1:2009, a excepción de los vacíos de agregado mineral (VAM) que tienen valores inferiores al mínimo establecido. Esto se atribuye a que los vacíos han sido ocupados por el ligante asfáltico envejecido en el material escarificado. Este aporte de material producto del escarificado, además ayudó a la mezcla a tener altas estabilidades, superiores a los rangos mínimos establecidos en la norma NTF 2000-1:2009 para carpetas de rodamiento destinadas a tránsito bajo. Por último, es importante destacar que la evaluación de la mezcla diseñada se realizó considerando una mezcla convencional de agregados vírgenes, debido a que la norma técnica Fondonorma (NTF 2000-1:2009) no posee especificación alguna para el diseño de mezclas con la incorporación de material escarificado.

Es mediante todos estos resultados, que podemos mencionar las siguientes recomendaciones:

Al momento de realizar la caracterización del material producto de la escarificación para el diseño de mezclas asfálticas con incorporación de éste, es importante realizar el ensayo de extracción de cemento asfáltico, con la finalidad de determinar el contenido de ligante asfáltico envejecido, y determinar las alteraciones que puedan presentarse debido a su presencia. Así como tomar la granulometría del agregado después de la extracción.

No se recomienda para tránsito alto, puesto que el material producto del escarificado añadido, eleva además los niveles de flujo y esto originaría inestabilidad bajo acción del alto tránsito.

Considerar la promulgación de estudios a fondo que den respuesta al desarrollo de un apartado normativo para el diseño de mezclas con incorporación de material producto del escarificado, y exista así una normativa vigente al respecto tomando en cuenta los diferentes beneficios de la utilización de estas mezclas.

Estudiar la incidencia en las mezclas asfálticas con incorporación de mezcla asfáltica reciclada de bajos porcentajes de vacíos en el agregado mineral y cómo influye en su comportamiento mecánico y durabilidad.

REFERENCIAS

- Arias, Fidias (2006). **El Proyecto de Investigación, Introducción a la metodología científica**. 5ta Edición. Caracas. Editorial Episteme.
- Asphalt Institute (2012). **Serie de Manuales No.22 (MS-22) Principios de Construcción de mezclas asfálticas en Caliente**. Administración Federal de Autopistas del Departamento de Transporte de los Estados Unidos de América.
- Augusto Jugo B. (PhD) (2014). **Construcción e Inspección en Obras de Pavimentación**. Guía Instructiva. Caracas. INVEAS.
- Avendaño, K. y Rodríguez, B. (2010), **Diseño y producción de una mezcla asfáltica en caliente con la Incorporación de material proveniente de la escarificación de carpetas asfálticas**. Tesis de Grado. Barquisimeto. Universidad Centro-Occidental Lisandro Alvarado.
- Corredor, Gustavo (2011). **Apuntes de Pavimentos, Volumen 1**. Edición 2008. Caracas. Editorial Universidad Católica Andrés Bello, Dpto. de publicaciones.
- Corredor, Gustavo (2011). **Apuntes de Pavimentos, Volumen 2**. Edición 2008. Caracas. Editorial Universidad Católica Andrés Bello, Dpto. de publicaciones.
- Crespo Villalaz, Carlos (2011). **Vías de Comunicación**. 4ta Edición. México D.F, México. Editorial Limusa.
- Del Pozo, J., Del Val, Miguel A., Gallego J., Querol, N. y Sampedro A (2000). **Huella de carbono del reciclado en planta asfáltica en caliente con altas tasas de RAP**” Artículo. Río de Janeiro, Brasil. XVI Concreto Ibero-Latinoamericano del Asfalto (XV CILA).
- Fernández, Vanessa (2008). **Caracterización de Asfalto Modificado con Caucho Molido Proveniente de Neumáticos Usados**. Tesis de Grado. Caracas. Universidad Simón Bolívar.

FUNDALANAVIAL. 2003. **Contenido de ligante asfáltico en mezclas de pavimento (por medio de la centrifuga) y granulometría de los agregados después de determinar el ligante asfáltico**

Propuesta de Norma Técnica Fondonorma NTF 2000-1:2009. **Capítulo 12-10**

Valdéz, G., Martínez, A., y Pérez, F. (2008). **Estudio de variabilidad del material asfáltico reciclable (RAP) y su influencia en las mezclas asfálticas recicladas fabricadas con altas tasas**. Artículo. Santiago de Chile, Chile. IX Congreso internacional Provia. Puerto Varas.

Yopez V. (2013). **¿Qué es una Recicladora de Asfalto?** Extraído el 15 de mayo de 2015 desde: <http://victoryepes.blogs.upv.es/2013/06/08/que-es-una-recicladora-de-asfalto/>.

ANEXOS

ANEXO A
CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL ASFÁLTICO RECICLADO (MAR)

Anexo A-1. Peso Específico Material Asfáltico Reciclado (Retenido en el tamiz #8)

(RETENIDO EN EL TAMIZ No 8)						
Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente con incorporación de MAR				FECHA 29/7/15		
MUESTRA		Material Asfáltico Reciclado				
PROCEDENCIA		Picadora San José de Quíbor				
	IDENTIFICACIÓN			1	2	3
A	PESO SSS. EN AIRE			426,9	680,2	513,5
B	PESO EN AGUA			252,7	405,6	303,9
C	PESO SECO EN AIRE			424,6	675,7	511,2
D	AGUA ABSORBIDA		A-C	2,3	4,5	2,3
E	% DE ABSORCIÓN		(D/C)*10 0	0,5	0,7	0,4
F	VOLUMEN			174,2	274,6	209,6
G	PESO ESPECIFICO BULK			2,437	2,461	2,439
H	PESO ESPECIFICO SSS			2,451	2,477	2,450
I	PESO ESPECIFICO APARENTE			2,470	2,502	2,466
PROMEDIOS DE RESULTADOS						
PESO ESPECIFICO BULK				2,438		
PESO ESPECIFICO SSS				2,459		
PESO ESPECIFICO APARENTE				2,479		
% ABSORCIÓN				0,6		

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo A-2. Peso Específico Material Asfáltico Reciclado (Pasante tamiz #8 – Retenido en el tamiz #200)

(PASANTE TAMIZ No 8 - RETENIDO EN EL TAMIZ No 200)						
Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente con incorporación de MAR					FECHA 29/7/2015	
MUESTRA		Material Asfáltico Reciclado				
PROCEDENCIA		Picadora San José de Quíbor				
	MATRAZ No	1	2	3		
A	PESO MATRAZ + MUESTRA SSS	470,8	446,2	496,1		
B	PESO MATRAZ	309	272,3	280,3		
C	PESO MUESTRA SSS	A-B	161,8	173,9	215,8	
D	PESO MUESTRA SECA	$C/(1+(\%ABS/100))$	156,82	168,54	209,15	
E	PESO MATRAZ + MUESTRA + AGUA	923,0	869,2	901,9		
F	PESO MATRAZ + AGUA	828,24	767,37	775,49		
G	VOLUMEN DE LA MUESTRA	C-E+F	67,04	72,07	89,39	
H	PESO ESPECIFICO BULK	D/G	2,339	2,339	2,340	
I	PESO ESPECIFICO SSS	C/G	2,413	2,413	2,414	
J	PESO ESPECIFICO APARENTE	$D/(G-(C-D))$	2,527	2,526	2,528	
K	TEMPERATURA DE ENSAYO	°C	23,7	24,2	23,7	
ABSORCIÓN						
Tara	Peso Tara	Muestra Húmeda +Tara	Muestra Seca + Tara	Agua	Muestra Seca	% Absorción
1	73,7	190,6	187	3,60	113,3	3,2
PROMEDIOS DE RESULTADOS REFERIDOS A 25 °C						
PESO ESPECIFICO BULK			2,339			
PESO ESPECIFICO SSS			2,413			
PESO ESPECIFICO APARENTE			2,527			
% ABSORCIÓN			3,2			

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo A-3. Peso Específico Material Asfáltico Reciclado

FECHA	1 1/2 "	1 "	3/4 "	1/2 "	3/8"	# 4	# 8	# 16	# 16	# 50	# 100	# 200
09/09/15	100,0	100,0	98,7	96,1	93,8	78,8	59,8	16,0	30,8	9,0	5,8	4,3
09/09/15	100,0	100,0	100,0	97,0	93,5	77,8	59,9	4,0	30,3	8,0	4,7	4,4
09/09/15	100,0	100,0	99,1	95,7	92,7	77,7	60,0	3,9	30,3	7,9	4,6	3,8
09/09/15	100,0	100,0	98,4	94,4	77,7	59,9	15,5		9,9	5,8	5,8	4,9
09/09/15	100,0	100,0	98,7	95,9	93,6	80,5	63,2		31,9	8,4	4,0	2,9
Promedio	100,0	100,0	99,0	95,8	90,3	74,9	51,7	8,0	30,8	7,8	5,0	4,0
Desviación	0,0	0,0	0,6	0,9	7,0	8,5	20,3	7,0	9,4	1,2	0,8	0,8

Fuente: Carrasco, Rojas.

ANEXO B
CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO PÉTREO

Anexo B-1. Peso Específico Arrocillo-Polvillo (Retenido en el tamiz #8)

(RETENIDO EN EL TAMIZ #8)					
Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente con incorporación de MAR				FECHA	07/10/15
MUESTRA		Arrocillo-Polvillo			
PROCEDENCIA		Picadora San José de Quíbor			
	IDENTIFICACIÓN	1	2	3	
A	PESO SSS. EN AIRE	785,3	628,2	833,6	
B	PESO EN AGUA	477,8	383,7	507,9	
C	PESO SECO EN AIRE	772,5	617,5	819,4	
D	AGUA ABSORBIDA	12,8	10,7	14,2	A-C
E	% DE ABSORCIÓN	1,7	1,7	1,7	(D/C)*100
F	VOLUMEN	307,5	244,5	325,7	A-B
G	PESO ESPECIFICO BULK	2,512	2,526	2,516	C/F
H	PESO ESPECIFICO SSS	2,554	2,569	2,559	A/F
I	PESO ESPECIFICO APARENTE	2,621	2,641	2,630	C/(C-B)
PROMEDIOS DE RESULTADOS					
PESO ESPECIFICO BULK		2,519			
PESO ESPECIFICO SSS		2,562			
PESO ESPECIFICO APARENTE		2,631			
% ABSORCIÓN		1,7			

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo B-2. Peso específico arrocillo-polvillo (Pasante tamiz #8 – retenido en el tamiz #200)

(PASANTE TAMIZ No 8 - RETENIDO EN EL TAMIZ #200)						
Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente con incorporación de MAR				FECHA 07/10/15		
MUESTRA		Arrocillo - Polvillo				
PROCEDENCIA		Picadora San José de Quíbor				
	MATRAZ No			1	2	3
A	PESO MATRAZ + MUESTRA SSS			487,8	481,9	491,4
B	PESO MATRAZ			308,9	272,4	280,2
C	PESO MUESTRA SSS		A-B	178,90	209,50	211,20
D	PESO MUESTRA SECA		$C/(1+(\%ABS/100))$	175,80	205,87	211,20
E	PESO MATRAZ + MUESTRA + AGUA (Después de vacío)			937,6	895,6	904,6
F	PESO MATRAZ + AGUA			828,23	767,4	775,51
G	VOLUMEN DE LA MUESTRA		(C+E)-F	69,53	81,26	82,11
H	PESO ESPECIFICO BULK		D/G	2,528	2,534	2,572
I	PESO ESPECIFICO SSS		C/G	2,573	2,578	2,572
J	PESO ESPECIFICO APARENTE		$D/(G-(C-D))$	2,646	2,652	2,572
K	TEMPERATURA DE ENSAYO		°C	23,1	23,0	22,9
ABSORCIÓN						
Tara	Peso Tara	Muestra Húmeda + Tara	Muestra Seca + Tara	Agua	Muestra Seca	% Absorción
1	73,7	223,9	221,3	2,6	147,6	1,8
PROMEDIOS DE RESULTADOS REFERIDOS A 25 °C						
PESO ESPECIFICO BULK				2,531		
PESO ESPECIFICO SSS				2,576		
PESO ESPECIFICO APARENTE				2,649		
% ABSORCIÓN				1,8		

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo B-3. Peso específico arrocillo-polvillo (Pasante tamiz #200)

PASANTE TAMIZ #200									
Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente con incorporación de MAR				FECHA 07/10/15					
MUESTRA		Arrocillo - Polvillo							
PROCEDENCIA		Picadora, San José de Quíbor							
	Picnómetro No	1	2						
A	Peso Picnómetro+ muestra seca	64,75	73,75						
B	Peso Picnómetro	53,52	58,26						
C	Peso muestra seca	A-B	11,23	15,49					
D	Peso Picnómetro+ muestra +Humedecedor ,después del vacío	140,9	148,8						
E	Peso Picnómetro+ Humedecedor a temperatura de ensayo	133,0	137,9						
F	Volumen de la muestra	C+E-D	3,33	4,59					
G	Peso específico aparente a 20°C	C/F	3,372	3,375					
H	Temperatura de ensayo	25,6	24,0						
I	Densidad del Kerosene a Temp. ensayo	0,783	0,784						
J	Peso específico aparente	G*I	2,641	2,646					
<table border="1" style="margin: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">RESULTADOS PROMEDIOS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">PESO ESPECIFICO APARENTE</td> <td style="text-align: center;">2,643</td> </tr> </tbody> </table>						RESULTADOS PROMEDIOS		PESO ESPECIFICO APARENTE	2,643
RESULTADOS PROMEDIOS									
PESO ESPECIFICO APARENTE	2,643								

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo B-4. Peso específico piedra picada (Retenido en el tamiz #8)

(RETENIDO EN EL TAMIZ #8)					
Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente con incorporación de MAR				FECHA 07/10/15	
MUESTRA		Piedra picada <3/4"			
PROCEDENCIA		Picadora San José de Quíbor			
IDENTIFICACIÓN		1	2	3	
A	PESO SSS. EN AIRE	1065,1	904,2	1004,4	
B	PESO EN AGUA	648,5	550,2	611,0	
C	PESO SECO EN AIRE	1048,6	891,9	988,2	
D	AGUA ABSORBIDA	A-C	16,5	12,3	16,2
E	% DE ABSORCIÓN	(D/C)*100	1,6	1,4	1,6
F	VOLUMEN	A-B	416,6	354,0	393,4
G	PESO ESPECIFICO BULK	C/F	2,517	2,519	2,512
H	PESO ESPECIFICO SSS	A/F	2,557	2,554	2,553
I	PESO ESPECIFICO APARENTE	C/(C-B)	2,621	2,610	2,620
PROMEDIOS DE RESULTADOS					
PESO ESPECIFICO BULK		2,516			
PESO ESPECIFICO SSS		2,555			
PESO ESPECIFICO APARENTE		2,617			
% ABSORCIÓN		1,5			

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo B-5. Peso específico arena (Retenido en el tamiz #8)

(RETENIDO EN EL TAMIZ #8)					
MUESTRA			Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente con incorporación de MAR		FECHA 14/10/15
PROCEDENCIA			Arena Lavada Picadora San José de Quíbor		
IDENTIFICACIÓN		1	2	3	
A	PESO SSS. EN AIRE	549,8	880,8	416,2	
B	PESO EN AGUA	332,8	533,4	251,1	
C	PESO SECO EN AIRE	536,1	856,5	404,7	
D	AGUA ABSORBIDA	A-C	13,7	24,3	11,5
E	% DE ABSORCIÓN	(D/C)*100	2,6	2,8	2,8
F	VOLUMEN	A-B	217,0	347,4	165,1
G	PESO ESPECIFICO BULK	C/F	2,471	2,465	2,451
H	PESO ESPECIFICO SSS	A/F	2,534	2,535	2,521
I	PESO ESPECIFICO APARENTE	C/(C-B)	2,637	2,651	2,635
PROMEDIOS DE RESULTADOS					
PESO ESPECIFICO BULK		2,462			
PESO ESPECIFICO SSS		2,530			
PESO ESPECIFICO APARENTE		2,641			
% ABSORCIÓN		2,7			

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo B-6. Peso específico arena (Pasante tamiz #8 – retenido en el tamiz #200)

(PASANTE TAMIZ #8 - RETENIDO EN EL TAMIZ #200)						
Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente con incorporación de MAR					FECHA 14/10/15	
MUESTRA			Arena Lavada			
PROCEDENCIA			Picadora San José de Quíbor			
	MATRAZ No		1	2	3	
A	PESO MATRAZ + MUESTRA SSS		464,8	427,8	451,5	
B	PESO MATRAZ		308,9	272,3	280,3	
C	PESO MUESTRA SSS		A-B	155,9	155,5	171,2
D	PESO MUESTRA SECA		152,2	151,8		
		$C/(1+(\%ABS/100))$	6	7	167,20	
E	PESO MATRAZ + MUESTRA + AGUA		923,4	862,3	880,3	
F	PESO MATRAZ + AGUA		827,8	767,0		
			6	5	775,23	
G	VOLUMEN DE LA MUESTRA	C-E+F	60,36	60,25	66,13	
H	PESO ESPECIFICO BULK	D/G	2,523	2,521	2,528	
I	PESO ESPECIFICO SSS	C/G	2,583	2,581	2,589	
J	PESO ESPECIFICO APARENTE	$D/(G-(C-D))$	2,684	2,682	2,691	
K	TEMPERATURA DE ENSAYO	°C	23,7	24,2	23,7	
ABSORCIÓN						
Tar	Peso Tara	Muestra Húmeda +Tara	Muestra Seca + Tara	Agua	Muestra Seca	% Absorción
1	73,7	232,1	228,4	3,70	154,7	2,4
PROMEDIOS DE RESULTADOS REFERIDOS A 25 °C						
	PESO ESPECIFICO BULK		2,524			
	PESO ESPECIFICO SSS		2,582			
	PESO ESPECIFICO APARENTE		2,683			
	% ABSORCIÓN		2,4			

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo B-7. Peso específico arena (Pasante tamiz #200)

ESNSAYO DE PESO ESPECIFICO PASANTE TAMIZ #200					
Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente con incorporación de MAR					FECHA 14/10/15
MUESTRA			Arena Lavada		
PROCEDENCIA			Picadora San José de Quíbor		
	Picnómetro	No	1	2	
A	Peso Picnómetro+ muestra seca		69,61	68,85	
B	Peso Picnómetro		53,52	58,26	
C	Peso muestra seca	A-B	16,09	10,59	
D	Peso Picnómetro+ muestra +Humedecedor ,después del vacío		144,47	145,59	
E	Peso Picnómetro+ Humedecedor a temperatura de ensayo		133,1	138,1	
F	Volumen de la muestra	C+E-D	4,72	3,1	
G	Peso específico aparente a 20°C	C/F	3,409	3,416	
H	Temperatura de ensayo		21,1	20,2	
I	Densidad del Kerosene		0,783	0,783	
J	Peso específico aparente	G*I	2,669	2,675	
RESULTADOS PROMEDIOS					
PESO ESPECIFICO APARENTE			2,672		

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo B-8. Granulometría Arrocillo-Polvillo

FECHA	1 1/2 "	1 "	3/4 "	1/2 "	3/8"	# 4	# 8	# 16	# 16	# 50	# 100	# 200
7/10/15	100,0	100,0	100,0	99,8	98,1	73,0	56,6	35,6	44,7	24,4	15,7	11,3
7/10/15	100,0	100,0	100,0	100,0	98,8	76,0	59,5	32,1	47,2	25,6	14,9	12,2
7/10/15	100,0	100,0	100,0	99,8	95,5	70,7	54,8	33,2	43,4	22,6	15,0	10,5
Promedio	100,0	100,0	100,0	99,9	97,5	73,2	57,0	33,6	45,1	24,2	15,2	11,4
Desviación	0,0	0,0	0,0	0,1	1,7	2,7	2,4	1,8	1,9	1,5	0,4	0,8

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo B-9. Granulometría Piedra Picada < 3/4 ''

FECHA	1 1/2 ''	1 ''	3/4 ''	1/2 ''	3/8''	# 4	# 8	# 16	# 16	# 50	# 100	# 200
7/10/15	100,0	100,0	100,0	50,4	11,2	3,8	3,7	4,1	3,6	3,3	1,3	1,3
7/10/15	100,0	100,0	100,0	46,9	12,3	4,3	4,1	4,2	4,0	3,6	1,7	2,9
7/10/15	100,0	100,0	100,0	54,1	17,4	5,5	5,0	4,4	4,9	4,4	2,0	2,6
Promedio	100,0	100,0	100,0	50,5	13,6	4,5	4,3	4,2	4,2	3,7	1,7	2,2
Desviación	0,0	0,0	0,0	3,6	3,3	0,8	0,7	0,2	0,7	0,6	0,4	0,9

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo B-10. Granulometría Arena

FECHA	1 1/2 "	1 "	3/4 "	1/2 "	3/8"	# 4	# 8	# 16	# 16	# 50	# 100	# 200
7/10/15	100,0	100,0	100,0	100,0	95,2	67,7	50,1	43,8	37,8	13,9	7,3	3,7
7/10/15	100,0	100,0	100,0	100,0	95,7	69,5	51,8	43,3	38,7	13,0	6,8	3,7
7/10/15	100,0	100,0	100,0	100,0	95,8	69,7	52,2	43,1	39,1	14,2	6,8	4,0
Promedio	100,0	100,0	100,0	100,0	95,6	69,0	51,4	43,4	38,5	13,7	7,0	3,8
Desviación	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,1	1,1	0,4	0,6	0,6	0,3	0,2

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo B-11. Equivalente de Arena.

Lectura	1	2	3
arena	3,5	3,4	4,1
arcilla	5,0	4,6	5
Equivalente%	70	73,9	82,0

Fuente: Carrasco, Rojas.

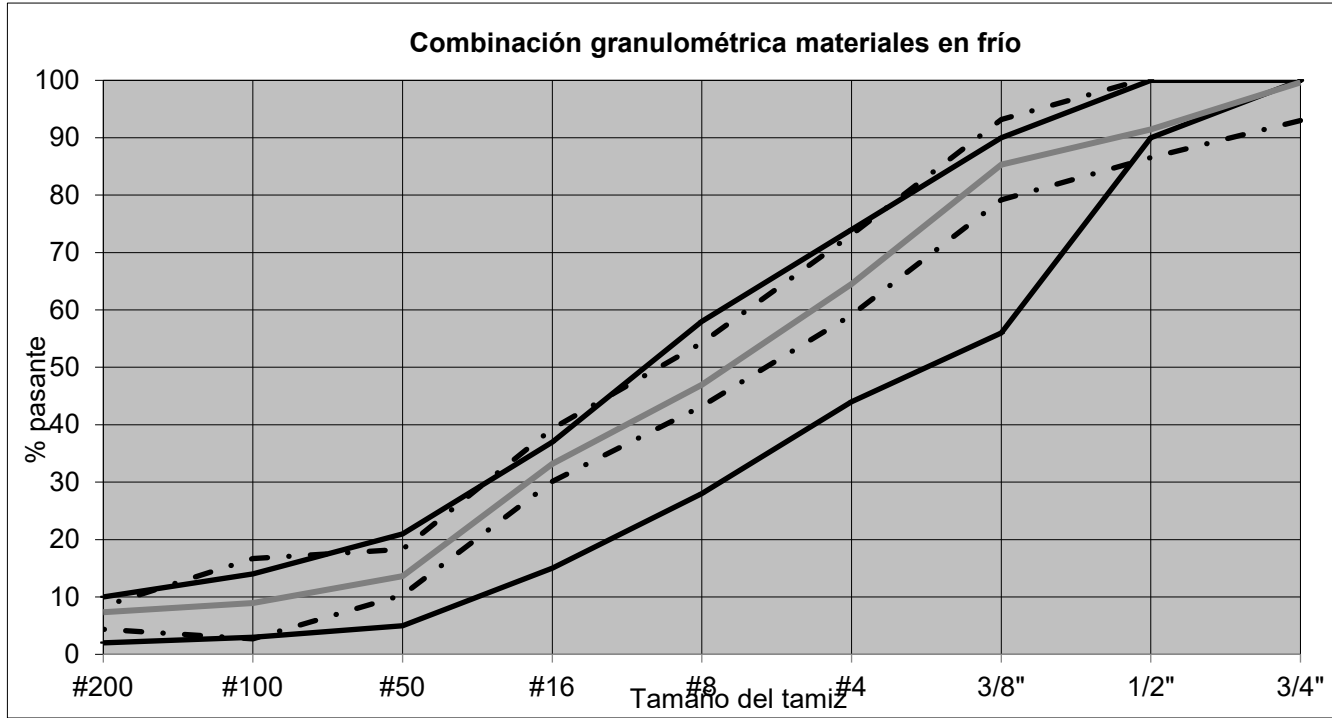
ANEXO C
DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CON INCORPORACIÓN DE MATERIAL
PRODUCTO DE LA ESCARIFICACIÓN

Anexo C-1. Combinación de agregados en frío

Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente con incorporación de MAR											
Diseño de Mezclas Asfáltica en Caliente con MAR									21/10/15		
Tipo de Mezcla M12			Combinación Granulométrica								
Agregados	% Participación	% Pasante el tamiz de									
		37,5mm	25,4 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,74 mm	2,36 mm	1.18 mm	0,30mm	0,074mm
		1 1/2"	1"	3/4"	1/2 "	3/8"	# 4	# 8	# 16	# 50	# 200
Arena Lavada.<3/8"	20,0%	100,0	100,0	100,0	100,0	95,6	69,0	51,4	38,5	13,7	3,8
Arrocillo-Polv.<1/2"	35,0%	100,0	100,0	100,0	99,9	97,5	73,2	57,0	45,1	24,2	11,4
P.Picada <3/4"	10,0%	100,0	100,0	100,0	50,5	13,6	4,5	4,3	4,2	3,7	2,2
MAR	35,0%	100,0	100,0	100,0	95,8	90,3	74,9	51,7	30,8	7,8	4,0
Combinación	100%	100,0	100,0	100,0	93,5	86,2	66,1	48,7	34,7	14,3	6,4
Límite superior		100,0	100	100	100	90	74	58	37	21	10
Límite inferior		100,0	100	100	90	56	44	28	15	5	2
Tolerancia Superior		100	100	100	101	93	73	54	39	18	8
Tolerancia Inferior		100	100	93	87	79	59	43	30	10	4

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo C-2. Curva granulométrica de los agregados en frío



Tolerancia - · - · -
 Especificaciones _____
 Combinación _____

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo C-3. Peso de agregado por briqueta en función del C.A. (1200gr.)

% C.A.	Peso C.A	% agregados	Peso del Agr.	P.p <3/4" 10%	Arrocillo 35%	Arena Lavada 20%	M.A.R. 35%	total
2,5	30	97,5	1170	117	409,5	234	409,5	1170
3	36	97	1164	116,4	407,4	232,8	407,4	1164
3,5	42	96,5	1158	115,8	405,3	231,6	405,3	1158
4	48	96	1152	115,2	403,2	230,4	403,2	1152
4,5	54	95,5	1146	114,6	401,1	229,2	401,1	1146
5	60	95	1140	114	399	228	399	1140
5,5	66	94,5	1134	113,4	396,9	226,8	396,9	1134

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo C-4. Peso de arena por briqueta en función del C.A, y granulometría. (1200gr.)

tamiz	%pasante	%pasante parcial	%ret. Parcial	contenido de cemento asfaltico %						
				2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
1"	100,0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
3/4"	100,0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
1/2"	100,0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
3/8"	95,6	19,12	0,88	10,31	10,26	10,21	10,15	10,10	10,05	9,99
#4	69,0	13,79	5,33	62,30	61,98	61,66	61,34	61,03	60,71	60,39
#8	51,4	10,27	3,52	41,22	41,01	40,80	40,59	40,38	40,17	39,96
Pasante #8			10,27	120,16	119,55	118,93	118,31	117,70	117,08	116,46

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo C-5. Peso de arrocillo-polvillo por briqueta en función del C.A, y granulometría. (1200gr.)

tamiz	%pasante	%pasante parcial	%ret. Parcial	contenido de cemento asfáltico %						
				2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
1"	100,0	35	0	0	0	0	0	0	0	0
3/4"	100,0	35	0	0	0	0	0	0	0	0
1/2"	99,9	34,95	0,05	0,61	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60	0,59
3/8"	97,5	34,12	0,83	9,73	9,68	9,63	9,58	9,53	9,48	9,43
#4	73,2	25,64	8,48	99,23	98,72	98,21	97,70	97,19	96,68	96,17
#8	57,0	19,95	5,69	66,56	66,22	65,88	65,54	65,20	64,86	64,52
Pasante #8			19,95	233,37	232,17	230,97	229,78	228,58	227,38	226,19

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo C-6. Peso de piedra picada por briqueta en función del C.A, y granulometría. (1200gr.)

tamiz	%pasante	%pasante parcial	%ret. Parcial	contenido de cemento asfaltico %						
				2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
1"	100,0	10	0	0	0	0	0	0	0	0
3/4"	100,0	10	0	0	0	0	0	0	0	0
1/2"	50,5	5,05	4,95	57,97	57,67	57,37	57,08	56,78	56,48	56,18
3/8"	13,6	1,36	3,68	43,07	42,85	42,63	42,41	42,19	41,97	41,74
#4	4,5	0,45	0,91	10,64	10,59	10,53	10,48	10,43	10,37	10,32
#8	4,3	0,43	0,03	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Pasante #8			0,43	5,01	4,99	4,96	4,94	4,91	4,88	4,86

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo C-7. Peso de Material Asfáltico Reciclado (MAR) por briqueta en función del C.A, y granulometría. (1200gr.)

tamiz	%pasante	%pasante parcial	%ret. Parcial	contenido de cemento asfáltico %						
				2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
1"	100,0	35	0	0	0	0	0	0	0	0
3/4"	100,0	35	0	0	0	0	0	0	0	0
1/2"	95,8	33,53	1,47	17,14	17,05	16,96	16,88	16,79	16,70	16,61
3/8"	90,3	31,59	1,94	22,75	22,63	22,51	22,40	0,00	22,16	22,05
#4	74,9	26,23	5,36	62,77	62,45	62,12	61,80	61,48	61,16	60,84
#8	51,7	18,10	8,13	95,13	94,64	94,15	93,66	93,18	92,69	92,20
Pasante #8			18,10	211,72	210,63	209,55	208,46	207,38	206,29	205,20

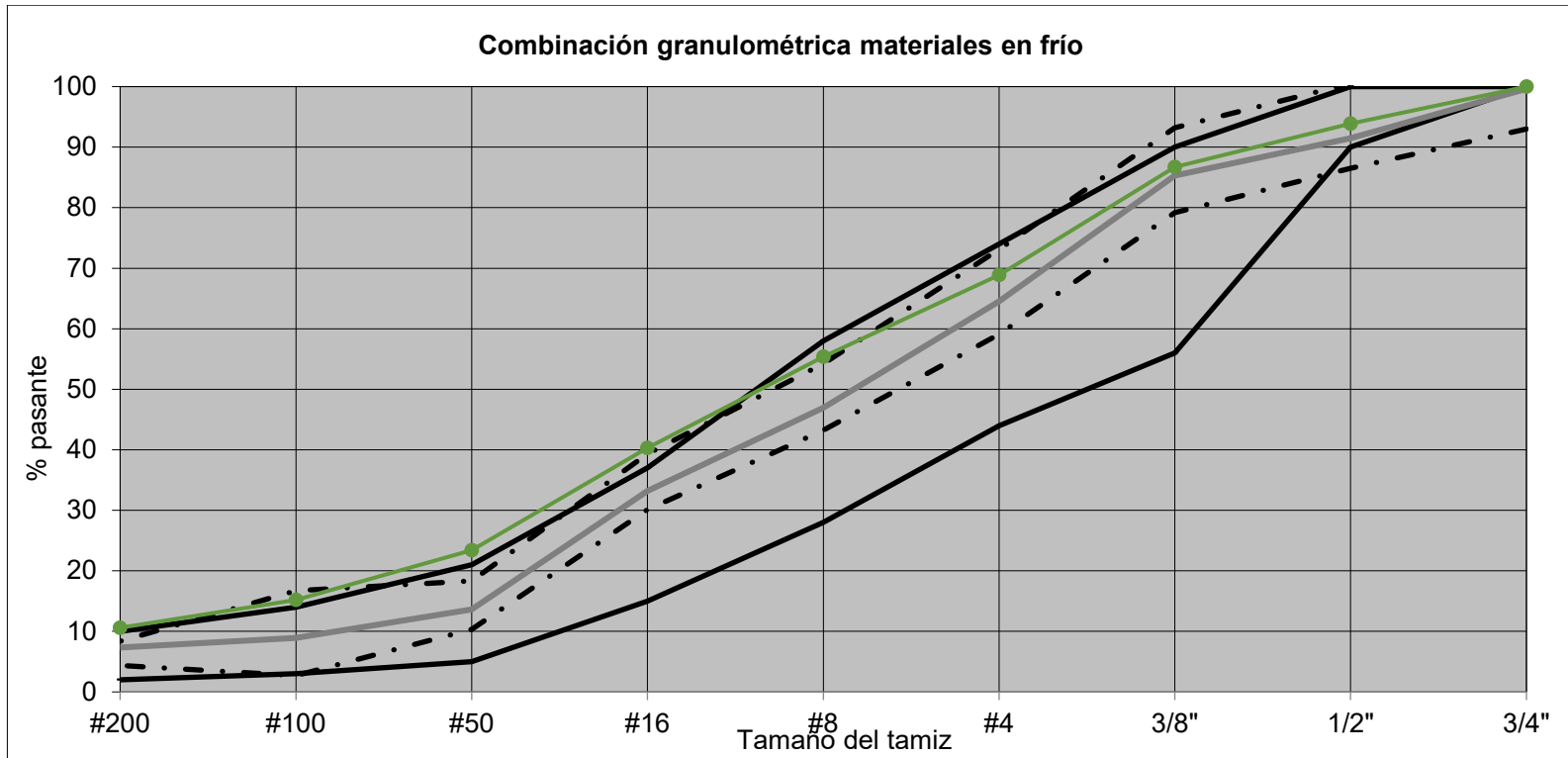
Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo C-8. Granulometría después de la extracción.

Diseño de Mezclas Asfáltica en Caliente con MAR						oct-15				
Tipo de Mezcla M12		Combinación en tolvas en frío								
Agregados	% Participación	% Pasante el tamiz de								
		19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,74 mm	2,36 mm	1.18 mm	0,30mm	0,15mm	0,074mm
		3/4"	1/2 "	3/8"	# 4	# 8	# 16	# 50	# 100	# 200
Arena Lavada.<3/8"	20,0%	100,0	100,0	95,6	69,0	51,4	38,5	13,7	7,0	3,8
Arrocillo-Polv.<1/2"	35,0%	100,0	99,9	97,5	73,2	57,0	45,1	24,2	15,2	11,4
P.Picada <3/4"	10,0%	100,0	50,5	13,6	4,5	4,3	4,2	3,7	3,0	2,2
MAR	35,0%	100,0	95,8	90,3	74,9	51,7	30,8	7,8	5,0	4,0
Combinación	100%	100,0	93,5	86,2	66,1	48,7	34,7	14,3	8,8	6,4
Extracción	-	100,0	93,9	86,7	68,9	55,4	40,3	23,4	15,2	10,6
Límite superior		100	100	90	74	58	37	21	14	10
Límite inferior		100	90	56	44	28	15	5	3	2
Tolerancia Superior		100	101	93	73	54	39	18	17	8
Tolerancia Inferior		93	87	79	59	43	30	10	3	4

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo C-9. Curva granulométrica después de la extracción.



Tolerancia - . - . -
 Especificaciones _____
 Combinación _____
 Extracción _____

Fuente: Carrasco, Rojas.

ANEXO D
EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MARSHALL DE LA MEZCLA
ASFÁLTICA DISEÑADA CON LA INCORPORACIÓN DE MATERIAL
ASFÁLTICO RECICLADO CON PARTICIPACIÓN DE 35% DEL PESO TOTAL
DEL AGREGADO

Anexo D-1. Propiedades Marshall empleando 2,5% de C.A

Muestra	Porcentaje de asfalto	Peso en aire (gr)	Peso en agua (gr)	Peso en aire sss (gr)	Volumen (cm3)	Peso unitario (gr/cm3)	Peso esp. máx. mezcla (Rice)	Vacios totales (%)	VAM (%)	VII (%)	Estabilidad leída (lbs)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (lbs)	Flujo (0,01 pulg)
No.														
1	2,50	1.211,6	658,5	1.213,2	554,7	2,184					3.837	0,93	3.568	10
2	2,50	1.205,3	657,3	1.207,2	549,9	2,192					3.737	0,93	3.475	9
3	2,50	1.207,3	655,9	1.208,6	552,7	2,184					3.565	0,93	3.315	10
Promedio	2,50					2,187	2,470	11,47	15,08	23,9			3.453	9,7

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo D-2. Propiedades Marshall empleando 3,0% de C.A

Muestra	Porcentaje de asfalto	Peso en aire (gr)	Peso en agua (gr)	Peso en aire sss (gr)	Volumen (cm3)	Peso unitario (gr/cm3)	Peso esp. máx. mezcla (Rice)	Vacios totales (%)	VAM (%)	VII (%)	Estabilidad leida (lbs)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (lbs)	Flujo (0,01 pulg)
No.														
1	3,00	1.208,3	670,0	1.209,2	539,2	2,241					4.000	0,93	3.720	11
2	3,00	1.205,3	671,4	1.206,4	535,0	2,253					4.190	0,96	4.023	12
3	3,00	1.206,0	669,0	1.206,9	537,9	2,242					3.955	0,93	3.678	12
Promedio	3,00					2,245	2,453	8,45	13,26	36,3			3.699	11,7

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo D-3. Propiedades Marshall empleando 3,5% de C.A

Muestra	Porcentaje de asfalto	Peso en aire (gr)	Peso en agua (gr)	Peso en aire sss (gr)	Volumen (cm3)	Peso unitario (gr/cm3)	Peso esp. máx. mezcla (Rice)	Vacios totales (%)	VAM (%)	VII (%)	Estabilidad leída (lbs)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (lbs)	Flujo (0,01 pulg)
No.														
1	3,50	1.211,4	677,0	1.212,8	535,8	2,261					4.335	0,93	4.032	13
2	3,50	1.211,6	677,7	1.212,8	535,1	2,264					3.936	0,93	3.661	13
3	3,50	1.212,1	678,2	1.213,1	534,9	2,266					3.982	0,96	3.822	13
Promedio	3,50					2,265	2,435	6,98	12,94	46,1			3.742	13,0

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo D-4. Propiedades Marshall empleando 4,0% de C.A

Muestra	Porcentaje de asfalto	Peso en aire (gr)	Peso en agua (gr)	Peso en aire sss (gr)	Volumen (cm3)	Peso unitario (gr/cm3)	Peso esp. máx. mezcla (Rice)	Vacios totales (%)	VAM (%)	VII (%)	Estabilidad leida (lbs)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (lbs)	Flujo (0,01 pulg)
No.														
1	4,00	1.207,3	678,4	1.209,6	531,2	2,273					3.365	0,96	3.230	14
2	4,00	1.208,1	682,8	1.208,8	526,0	2,297					3.945	0,96	3.788	16
3	4,00	1.206,7	681,4	1.207,6	526,2	2,293					3.755	0,96	3.605	14
Promedio	4,00					2,295	2,418	5,08	12,25	58,5			3.696	14,7

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo D-5. Propiedades Marshall empleando 4,5% de C.A

Muestra	Porcentaje de asfalto	Peso en aire (gr)	Peso en agua (gr)	Peso en aire sss (gr)	Volumen (cm3)	Peso unitario (gr/cm3)	Peso esp. máx. mezcla (Rice)	Vacios totales (%)	VAM (%)	VII (%)	Estabilidad leida (lbs)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (lbs)	Flujo (0,01 pulg)
No.														
1	4,50	1.206,8	682,6	1.207,1	524,5	2,301					3.583	0,96	3.439	13
2	4,50	1.211,6	685,4	1.212,1	526,7	2,300					3.900	0,96	3.744	15
3	4,50	1.211,0	684,6	1.211,8	527,2	2,297					3.610	0,96	3.465	12
Promedio	4,50					2,299	2,401	4,23	12,54	66,3			3.550	13,3

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo D-6. Propiedades Marshall empleando 5,0% de C.A

Muestra	Porcentaje de asfalto	Peso en aire (gr)	Peso en agua (gr)	Peso en aire sss (gr)	Volumen (cm3)	Peso unitario (gr/cm3)	Peso esp. máx. mezcla (Rice)	Vacios totales (%)	VAM (%)	VII (%)	Estabilidad leida (lbs)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (lbs)	Flujo (0,01 pulg)
No.														
1	5,00	1.211,6	689,1	1.211,9	522,8	2,318					3.465	0,96	3.326	17
2	5,00	1.204,4	683,2	1.204,7	521,5	2,309					3.338	1,00	3.338	18
3	5,00	1.206,2	686,0	1.206,4	520,4	2,318					3.537	1,00	3.537	18
Promedio	5,00					2,315	2,384	2,90	12,41	76,6			3.400	17,7

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo D-7. Propiedades Marshall empleando 5,5% de C.A

Muestra	Porcentaje de asfalto	Peso en aire (gr)	Peso en agua (gr)	Peso en aire sss (gr)	Volumen (cm3)	Peso unitario (gr/cm3)	Peso esp. máx. mezcla (Rice)	Vacios totales (%)	VAM (%)	VII (%)	Estabilidad leída (lbs)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (lbs)	Flujo (0,01 pulg)
No.														
1	5,50	1.206,4	685,5	1.206,7	521,2	2,315					3.093	1,00	3.093	18
2	5,50	1.207,9	687,4	1.208,1	520,7	2,320					2.784	1,00	2.784	9
3	5,50	1.205,3	685,6	1.205,4	519,8	2,319					3.356	1,00	3.356	18
Promedio	5,50					2,318	2,368	2,11	12,77	83,5			3.224	18,0

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo D-8. Peso específico de los agregados combinados

Pesos Específicos				Pesos específicos de la combinación	
Fracción	Bulk (Gsb)	Aparente (Gsa)	% en combinación	Bulk (Gsb)	Aparente (Gsa)
Retenido #8	2,479	2,576	51,3	2,481	2,596
Pasa #8 Ret #200	2,459	2,611	42,4		
Pasa #200	2,652	2,652	6,4		
		Total	100%		

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo D-9. Pesos específicos de los agregados

Agregado en frio	Peso Específico Bulk (masivo)			Total	% en combinación
	Retenido # 8	Pasa # 8 – Ret #200	Pasa #200		
Arrocillo-Polvillo.	2,519	2,531	2,643	2,538	35,0%
Granulometría	43,0	45,6	11,4	100,0	
Arena Lavada	2,462	2,524	2,672	2,499	20,0%
Granulometría	48,6	47,6	3,8	100,0	
P,Picada<3/4"	2,516	2,531	2,643	2,519	10,0%
Granulometría	95,7	2,0	2,2	100,0	
M.A.R.	2,438	2,339	0,000	2,488	35,0%
Granulometría	48,3	47,7	4,0	100,0	
Total	2,479	2,459	2,652		

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo D-10. Peso específico aparente

Agregado en frío	Ret- 8	Pasa 8- Ret 200	Pasa 200	Total	% en combinación
Arrocillo-polvillo	2,631	2,649	2,643	2,641	35,0%
Granulometría	43,0	45,6	11,4	100,0	
Arena Lavada	2,641	2,683	2,672	2,662	20,0%
Granulometría	48,6	47,6	3,8	100,0	
P.Picada <3/4"	2,617	2,649	2,643	2,618	10,0%
Granulometría	95,7	2,0	2,2	100,0	
M.A.R.	2,479	2,527	0,000	2,608	35,0%
Granulometría	48,3	47,7	4,0	100,0	
Total	2,576	2,611	2,652		

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo D-11. Resumen de resultados

%C.A	Peso Unitario	Estabilidad	Flujo	Vacíos totales	VAM	VII
2,50	2,187	3.453	9,7	11,47	15,08	23,93
3,00	2,245	3.699	11,7	8,45	13,26	36,27
3,50	2,265	3.742	13,0	6,98	12,94	46,08
4,00	2,295	3.696	14,7	5,08	12,25	58,52
4,50	2,299	3.550	13,3	4,23	12,54	66,29
5,00	2,315	3.400	17,7	2,90	12,41	76,6
5,50	2,318	3.224	18,0	2,11	12,77	83,5

Fuente: Carrasco, Roja

Anexo D-12. Gravedad específica máxima de la mezcla sin compactar (Gmm)

	Diseño	
Porcentaje de asfalto en la muestra	4,00	
Muestra	1	2
Peso frasco	2.687,2	2.687,2
Peso frasco + agua	4.284,7	4.284,5
Peso frasco + muestra	3.287,2	3.287,2
Peso frasco + muestra + agua (después del vacío parcial)	4.636,7	4.636,2
Peso muestra	600,0	600,0
Muestra + Frasco + Agua	4.884,7	4.884,5
Volumen de la muestra	248,0	248,3
Gmm muestra	2,420	2,416
Temperatura Ensayo °C	25,3	24,4
Gmm promedio	2,418	

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo D-13. Análisis comparativos de resultados.

Mezcla tipo: M12					
%Cemento Asfáltico: 4,6					
			Norma	Fondo Norma (NTF 2000-1:2009)	
Propiedad	Unidad	Valor		Criterio de la Norma	Condición
Peso Unitario	kg/m ³	2,307		No Aplicable	O.K.
Estabilidad	lbs	4.060		>= 1200 lbs	O.K.
Flujo	0,01"	11,8		8 – 16	O.K.
Vacíos totales (VT)	%	4,00		3 – 5	O.K.
Vacíos en el agregado Mineral (VAM)	%	13,55		> 13,0	O.K.
Vacíos llenados (VLL)	%	69,00		65 - 75 (*)	O.K.

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo D-14. Extracción de cemento asfáltico.

ENSAYO DE EXTRACCION	
PESO MUESTRA=	1208,9
PESO ORIGINAL FILTRO=	19,4
PESO FINAL FILTRO=	20
VARIACION EN FILTRO=	0,6
VOLUMEN / LIQUIDO TOTAL USADO=	3500
PARTE ALICUOTA=	25
PROPORCION DEL TOTAL=	140
PESO DEL CRISOL + RESIDUO=	26,05
PESO DEL CRISOL=	25,95
PESO DEL RESIDUO=	0,1
PESO DE LA CENIZA=	14
PESO DE LOS AGREGADOS=	1119,5
VARIACION EN EL FILTRO=	0,6
PESO DE LA CENIZA=	14
PESO TOTAL DE LOS AGREGADOS=	1134,1
PESO DE ASFALTO EN LA MEZCLA=	74,8
% DE ASFALTO EN LA MEZCLA=	6,19

Fuente: Carrasco, Rojas.

Anexo D-15. Tamaño de partículas.

TAMAÑO DE LAS PARTICULAS			Material: Extraccion		
			P. muestra:		1134,1
21,4	mm	(mm) ^{0.45}	P. Ret. Acum.	% reten. Acumulado	% pasante
1"	25,4	4,29	0,0	0,0	100
3/4"	19	3,76	0,0	0,0	100
1/2"	12,5	3,12	69,5	6,1	93,9
3/8"	9,5	2,75	150,6	13,3	86,7
N° 4	4,75	2,02	352,8	31,1	68,9
N° 8	2,36	28,70	506,0	44,6	55,4
N° 16	0,6	355,40	677,0	59,7	40,3
N°50	0,3	566,90	869,2	76,6	23,4
N°100	0,15	693,90	961,2	84,8	15,2
N°200	0,075	806,50	1013,4	89,4	10,6

Fuente: Carrasco, Rojas

