

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La combinación de aceite quemado de motor con mezclas asfálticas que son realizadas con pavimento asfáltico reciclado, es una nueva tendencia en diseñar o construir carreteras con materiales reciclables que pueden tener beneficios económicos y ambientales.

Realizar mezclas con materiales reciclables como el propio pavimento asfáltico es muy usados en otros países (como España, E.E.U.U. y Alemania), donde ya se construye carreteras a bajo costo y sobre todo se aporta a cuidar el medio ambiente dando buenos resultados. De tal manera, en Bolivia se tiene muy poco conocimiento de estas nuevas técnicas de reciclaje, por lo tanto se busca realizar una nueva propuesta o técnica de reciclaje, como implementar aceite quemado de motor en las mezclas recicladas y ver sus beneficios para poder reciclar este material.

Es importante aprovechar el pavimento reciclado para su reutilización en el diseño de mezcla asfálticas, para construir o hacer mantenimientos de carreteras y evitar la sobre explotación de los materiales de los ríos de nuestra región. Buscando diversas formas que ayuden a usar pavimentos envejecidos que cumplieron su vida útil es usar aceite quemado de motor que actuara como aditivo en la mezcla para mejorar las propiedades de la mezcla.

En el presente trabajo se propone evaluar la combinación del aceite quemado de motor sobre las propiedades de resistencia de una mezcla asfáltica nueva o virgen realizada con pavimento reciclado, considerando como una técnica de reciclaje para la reutilización de los pavimentos asfálticos usados, de tal manera, se pueda definir qué mejoras y beneficios puede traer esta propuesta de reciclaje.

La finalidad de este trabajo es que sea un aporte de una nueva técnica de reciclaje ya que se espera que al usar el aceite quemado de motor actué como un agente rejuvenecedor del pavimento asfáltico reciclado. Siendo aplicable esta mezcla para pavimentar calles de zonas urbanas. Y tendrá gran relevancia social ya que es un aporte a construir carreteras a bajo costo y ayudar a la conservación del medio ambiente.

1.1. DISEÑO TEÓRICO

1.1.1. Planteamiento del problema

1.1.1.1. Situación problemática

Conceptualización puntual del objeto de estudio

Las técnicas de mezclas asfálticas con material reciclados son mezclas que se realizan con el propósito de buscar aditivos como el aceite quemado de motor para el reuso de un pavimento viejo o usar otros materiales como el hormigón viejo como agregado para una nueva mezcla asfáltica, resultados en cuanto a su construcción sea más económica, evitar la contaminación del medio ambiente y la sobre explotación de los materiales de los ríos.

Descripción del fenómeno ocurrido

Al realizar mezclas asfálticas con material reciclado se busca conservar las propiedades de resistencia del asfalto en los pavimentos, buscando obtener una mezcla asfáltica con más, igual o con una resistencia y durabilidad dentro un rango aceptable de tal manera que puedan modificar sus propiedades en beneficio de un mejor pavimento, o buscar la manera de reciclar pavimento y obtener un pavimento que cumpla las condiciones mínimas, esto se puede realizar con diferentes métodos. Para este caso la mezcla asfáltica será usando aceite quemado de motor, más asfalto nuevo, agregados nuevos y pavimentos recuperado.

Breve explicación de la perspectiva de solución

Mediante ensayos de laboratorio es necesario determinar como alternativa de solución hacer una evaluación de los conocimientos de las propiedades de resistencia de una mezcla asfáltica con aceite quemado de motor más mezcla asfáltica nueva y pavimento reciclado, que propiedades se modifican o se mantienen, para que el uso de pavimento reciclado, sea una alternativa de realizar en carreteras a menor costo.

1.1.1.2. Problema de investigación

¿Cómo una evaluación, nos determinara el comportamiento de las propiedades de resistencia de una mezcla asfáltica, cuando se combinan la mezcla con aceite quemado de motor y pavimento asfáltico reciclado?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Evaluar las propiedades de resistencia de la combinación del aceite quemado de motor con una mezcla asfáltica nueva realizada con pavimento reciclado, de tal manera, se pueda definir qué efectos, mejoras y beneficios puede traer esta propuesta de reciclaje.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar un marco teórico sobre las técnicas de reciclaje en caliente.
- Realizar la caracterización de los materiales que conforman la mezcla asfáltica que se va a hacer.
- Elaborar briquetas, con diferentes porcentajes de aceite quemado de motor para la mezcla.
- Determinar un porcentaje óptimo de aceite quemado en la mezcla asfáltica.
- Evaluar la estabilidad y flujo Marshall en las mezclas de estudio.

1.3. HIPÓTESIS

Si se aplica aceite quemado de motor en distintos porcentajes a una mezcla asfáltica en caliente que contiene pavimento reciclado, entonces se podrá mejorar sus propiedades de resistencia de la mezcla y ver su eficiencia como una nueva técnica de reciclaje.

1.4. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES

1.4.1. Variable independiente

Porcentaje de aceite quemado de motor

1.4.2. Variable dependiente

Propiedades de las mezclas asfálticas.

1.4.3. Conceptualización y operacionalización de variables

Tabla 1.4.1 Conceptualización y operacionalización de variable independiente

Variable Nominal	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor Acción
Variable independiente Aceite quemado de motor	Es un aceite lubricante desechado de los motores diésel una vez que cumplió su vida útil de funcionamiento.	Punto de inflamación.	Temperatura °C	Vaso abierto de Cleveland
		Tipo de aceite quemado	Aceite de motores diésel de tipo 15w40 Porcentajes (5%, 10% y 15%)	Peso (gr) para su dosificación

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.4.2 Conceptualización y operacionalización de la variable dependiente

Variable Nominal	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor Acción
Variable dependiente Propiedades de las mezclas asfálticas.	Son propiedades que tienen las mezclas asfálticas en caliente las cuales tienen que cumplir parámetros de diseño para su aplicación.	Agregados del RAP	Caracterización	Granulometría
				Peso Específico
		Agregados nuevos de aportación.		Peso unitario
				Desgaste de los ángeles, equivalente de arena.
		Cemento asfáltico nuevo		Penetración, ductilidad, punto de ablandamiento, punto de inflamación
		Mezcla asfáltica con materiales reciclados	Estabilidad (libras).	Ensayos Método Marshall
	Fluencia (pulgadas).			

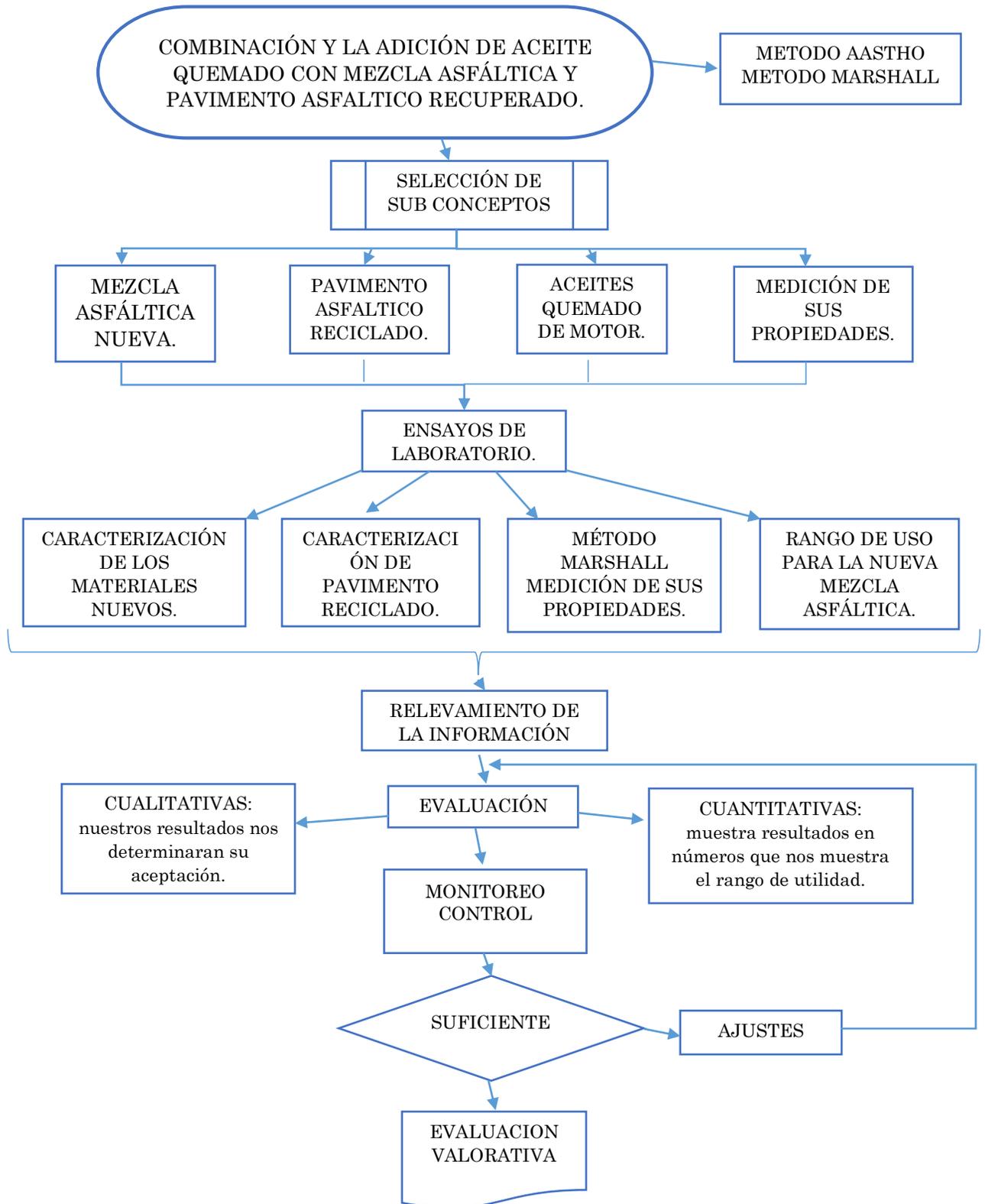
Fuente: Elaboración propia

1.5. DISEÑO METODOLÓGICO

1.5.1. Tipo de diseño de investigación

Investigación explicativo (Relaciona variables, considerando causas y efectos en su comportamiento). El presente proyecto de diseño de investigación es de tipo de investigación causal o explicativa. Ya que se usa para pronosticar los resultados esperados mediante la realización de los ensayos de laboratorio.

1.5.2. Diseño de investigación de ingeniería



1.5.3. Unidades de estudio y decisión muestral por variable

Unidad de estudio o muestreo

La unidad de estudio o muestra son las propiedades de resistencia de una mezcla asfáltica con material reciclado.

1.5.3.1. Población

Son las propiedades de una mezcla asfáltica como ser:

Durabilidad

Impermeabilidad

Trabajabilidad

Flexibilidad

Resistencia a la fatiga

Resistencia al deslizamiento

Densidad

Estabilidad

Fluencia

Porcentaje de vacíos

1.5.3.2. Muestra

Propiedades de resistencia técnica de una mezcla asfáltica elaborada con materiales reciclados.

Densidad

Estabilidad

Fluencia

Porcentaje de vacíos.

1.5.3.3. Tamaño de muestra

El tamaño de muestra se realiza obteniendo una cantidad de material del pavimento asfáltico recuperado y aceite quemado de motor diésel del parque automotor de la ciudad de Tarija para poder realizar los ensayos de laboratorio, los cuales se pretenden tener un tipo de pavimento reciclado (RAP) para realizar los ensayos correspondientes y definir la cantidad de propiedades que sufren efectos al combinar la mezcla con RAP y aceite.

Tabla 1.5.1. Cantidad de ensayos aproximados en el diseño

Grupos	Ni	σ^2	Ni* σ^2	fr	ni	ni
Granulometría	10	0,15	1,5	0,04	5,02	6
Peso específico agregado grueso	6	0,15	0,9	0,03	3,01	3
Peso específico agregado fino	6	0,15	0,9	0,03	3,01	3
Contenido de asfalto	3	0,15	0,45	0,01	1,51	2
Desgaste de los ángeles	3	0,15	0,45	0,01	1,51	2
Equivalente de arena	3	0,15	0,45	0,01	1,51	2
Penetración al cemento asfáltico	3	0,15	0,45	0,01	1,51	2
Viscosidad	3	0,15	0,45	0,01	1,51	2
Ductilidad	3	0,15	0,45	0,01	1,51	2
Punto de inflamación	5	0,15	0,75	0,02	2,51	3
Punto de ablandamiento	3	0,15	0,45	0,01	1,51	2
Peso específico del C. asfáltico	3	0,15	0,45	0,01	1,51	2
Estabilidad	70	0,15	10,5	0,30	35,15	36
Flujo	70	0,15	10,5	0,30	35,15	36
Resistencia Marshall	40	0,15	6	0,17	20,09	21
Total=	231	Total=	34,65	Total=	116	124

$e=$	5 %
$z=$	1,96
$\sigma^2=$	0,15

$$n_i = f_i * n$$

$$n = \frac{\sum Ni * \sigma^2}{N * \left(\frac{e}{z}\right)^2 + \sum \frac{Ni * \sigma^2}{N}}$$

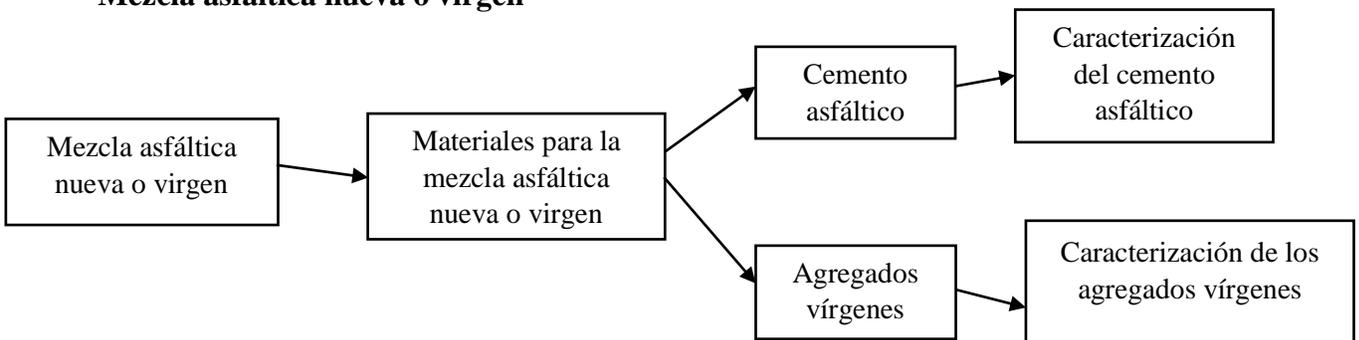
$$n = \frac{34,65}{231 * \left(\frac{0,05}{1,96}\right)^2 + \frac{34,65}{231}}$$

$$n = 115,37 \approx 116 \text{ pruebas}$$

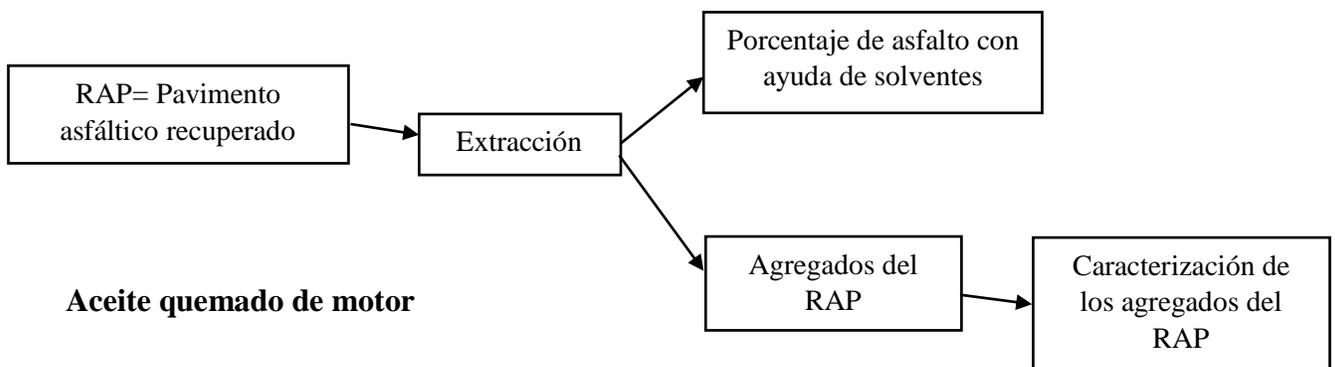
1.5.3.4. Selección de las técnicas de muestreo

En los siguientes esquemas explicativos se muestra la técnica experimental que se realizara.

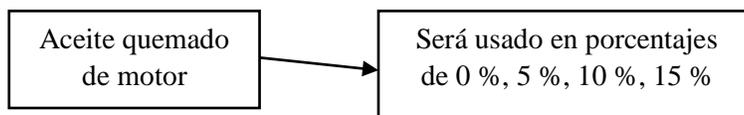
Mezcla asfáltica nueva o virgen



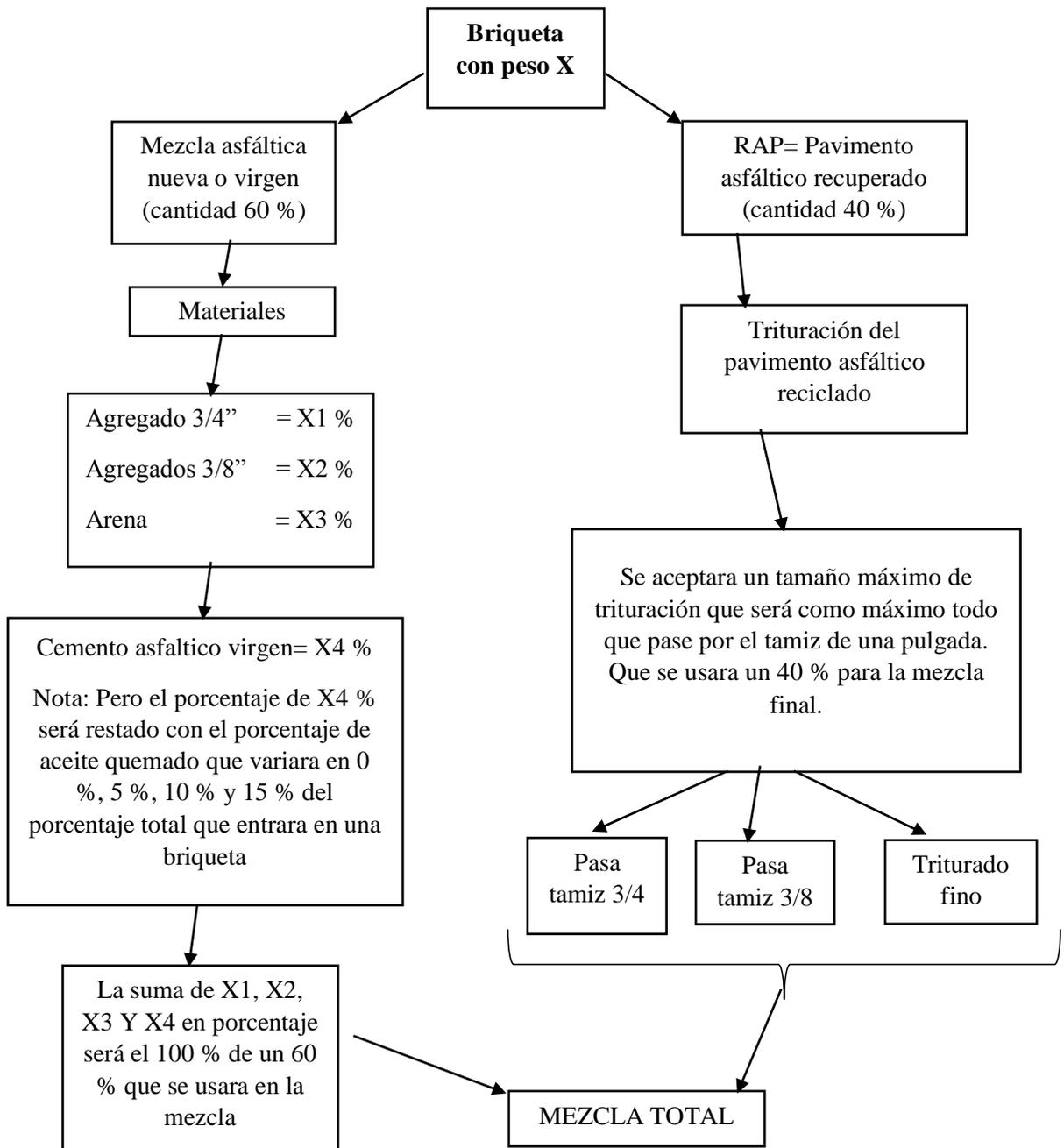
Pavimento asfáltica reciclado



Aceite quemado de motor



Método de elaboración



1.5.3.5. Técnicas

Ensayo a los materiales

Granulometría, límites de Atterberg, (Limite líquido, limite plástico, índice de plasticidad), resistencia al desgaste, peso específico (agregado fino y agregado grueso), peso unitario (agregado grueso y fino), equivalente de arena, peso unitario (agregado grueso y fino).

Ensayo al cemento asfáltico

Penetración, ductilidad, punto de inflamación, peso específico punto de ablandamiento.

Ensayos a la mezcla asfáltica

Ensayo de estabilidad y flujo Marshall, contenido de asfalto efectivo de la mezcla, porcentaje de vacíos en la mezcla (Vv), porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM), porcentaje de vacíos llenos de asfaltos (R.B.V), densidad.

1.5.3.6. Medios

Para la caracterización de los agregados

Para los agregados de aportación:

Horno eléctrico. El horno eléctrico es utilizado para el secado de los agregados de aportación, y debe contar con una temperatura constante de 100 a 110 °C.

Balanza. La balanza es usada para obtener los distintos pesos que se requiera, con una sensibilidad de 0.1 gr.

Juego de tamices. El juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11, lo cual contiene los tamices 3", 2 1/2", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N° 10, N° 40, N° 200, tapa y fondo.

Para la caracterización del cemento asfáltico

Para el cemento asfáltico de aportación:

Penetrómetro de asfalto que sirve para determinar la penetración del betún en estudio.

Aparato para la determinación del punto de inflamación Cleveland de copa abierta, con el cual se determina el punto de Ignición o punto de llama del betún en estudio.

Peso específico, que sirve para determinar la densidad del cemento asfáltico.

Punto de reblandecimiento anillo y bola, sirve para calcular el índice de penetración y estimar mediante su valor la susceptibilidad de los asfaltos.

Ductilidad del cemento asfáltico, para ver si está dentro de las especificaciones técnicas que se requieren.

Para la dosificación y diseño de briquetas

Moldes de compactación Marshall, en estos moldes se vaciará la mezcla bituminosa reciclada, creando briquetas con distintos porcentajes de betún.

Compactador para moldes Marshall, este compactador sirve para compactar las briquetas según especificaciones técnicas.

Para los ensayos de resistencia técnica

Marco de carga multiplex Marshall este marco sirve para disponer en él los distintos cabezales, según las pruebas que se requiera.

Cabezal de rotura Marshall, este cabezal junto con el marco multiplex, permite realizarlos ensayos de estabilidad y fluencia para las briquetas en análisis.

1.6. Justificación

El estudio del presente trabajo tiene una finalidad de buscar la manera de utilizar materiales que sean reciclables en nuestro medio y utilizarlos en las mezclas asfálticas convencionales en caliente o en otras. Tal es el caso de utilizar el mismo pavimento de una carretera, reciclarlo para reusarlos en un nuevo diseño y como toda mezcla con RAP necesita un aditivo rejuvenecedor que para este caso se usara aceite quemado de motor para ver de qué manera ayuda a la mezcla y evaluar si funcionara como un aditivo y que porcentaje es lo ideal.

Es una alternativa para aliviar los citados problemas del uso de RAP en grandes proporciones para mezclas asfálticas, es el uso de agentes rejuvenecedores, lo que permite

que el RAP sea mezclado de forma efectiva con materiales vírgenes. Existen investigaciones enfocadas a la utilización de diversos compuestos como agentes rejuvenecedores para uso con RAP, entre ellos varios tipos de aceites de origen mineral y biológico.

Actualmente, existen dos revisiones con respecto al uso del RAP y aceite quemado de motor (además de otros agentes rejuvenecedores) en mezclas asfálticas, discutiendo por una parte usos de RAP y su capacidad para usar en reciclaje junto con aceite quemado de motor como agente rejuvenecedor (Dhananjay et al., 2016) obteniendo los siguientes resultados:

Al aumentar el porcentaje de asfalto envejecido hay un aumento significativo en la rigidez, viscosidad y temperatura crítica de la mezcla.

El uso de RAP produce aproximadamente un 78 % de reducción en el contenido óptimo del ligante utilizado en los proyectos de carreteras.

El uso del RAP reduce los costos de construcción ya que su adición a mezclas asfálticas muestra mejores resultados que el de las mezclas con material virgen.

El reciclaje de asfalto beneficia al medio ambiente de muchas maneras. En particular, reduce la explotación de canteras, la minería y el consumo de petróleo.

El reciclaje de asfalto, también reduce drásticamente el consumo de recursos tales como combustible, maquinaria, transporte y mano de obra en comparación con la producción de materiales de asfalto virgen.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLABLES EN CALIENTE

2.1. DEFINICIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

Es una combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas que se utilizan para construir firmes o la carpeta de rodadura. Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de “aglomerados” o “mezclas bituminosas”, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráficos pesados intensos.

Las mezclas asfálticas asumen un papel muy importante y fundamental en los pavimentos flexibles porque constituyen la parte más costosa de toda la estructura; deben ser realizadas en proporciones exactas.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5 % de polvo mineral (filler) y otro 5 % de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

Generalmente las mezclas son fabricadas en centrales fijas o móviles, desde donde se transportan hasta la obra, allí se deben extender y compactar a temperaturas y viscosidades óptimas, por lo que para garantizar estas condiciones, en algunos casos se utilizan aditivos químicos o modificadores como zeolitas, caucho o incluso diferentes tipos de aceites, (Kreamer , y otros, 2004), para corroborar que están acordes con las especificaciones y requerimientos de INVIAS a cada lote se le debe realizar las pruebas de diseño Marshall.

2.2. COMPONENTES DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

Para el buen funcionamiento de la carpeta asfáltica, se deben tener en cuenta ciertas características físicas, como la forma y angulosidad, un agregado mineral deseable es aquel que cuenta con la proporción de partículas equidimensionales. También se debe tener en cuenta características mecánicas, como lo son la resistencia al desgaste ya que es un factor importante en la evolución del pavimento después de su puesta en servicio y la resistencia en pulimento que es la resistencia en perder aspereza en su textura superficial, agregado áspero evitan el deslizamiento del pavimento. De igual forma, las características químicas como la adhesividad son importantes, una buena afinidad polar por el ligante impide el desplazamiento del ligante asfáltico de la superficie del agregado.

2.2.1. Agregados o materiales para la mezcla asfáltica

Los agregados utilizados que componen una mezcla asfáltica para la pavimentación se clasifican según su tamaño en: agregado grueso, agregado fino y llenante mineral.

Agregado grueso

Se considera agregado grueso a todo material que sea retenido por el tamiz N° 4 (4,75 mm). Este agregado deberá ser limpio, resistente y durable, sin exceso de partículas planas, alargadas o desintegrables a demás estará exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias que puedan impedir la adhesión completa del asfalto.

Agregado fino

Se considera material fino a todo aquel que logre pasar el tamiz N° 4 (4,75 mm). Y es retenido en el tamiz N° 200 (0,074 mm). En este rango se encuentran las arenas gruesas y finas las cuales son separadas por el tamiz N° 10(2 mm). Está constituido por arena de trituración o una mezcla con arena natural, los granos del agregado fino deberá estar libre de cualquier sustancia que impida la adhesión del asfalto.

Llenante mineral o filler

Su principal característica es que pasa el tamiz N° 200 (0,074 mm). Siendo el polvo de roca más utilizado en las mezclas asfálticas realizadas en nuestra región, teniendo su origen durante el proceso de trituración dl material granular de mayor tamaño. Aporta un incremento a la magnitud de la resistencia a la deformación de la mezcla, incrementa la

durabilidad de la capa de rodadura evitando la acción del desplazamiento que ejerce el agua al asfalto, debido a que reduce los poros superficiales evitando el acceso del agua al interior.

¿Qué es reciclar?

Proceso simple o complejo que sufre un material o producto para ser reincorporado, a un ciclo de producción o de consumo.

¿Por qué reciclar?

- Proceso simple que ayuda a resolver muchos problemas creados por la vida moderna.
- Se salvan grandes cantidades de recursos no renovables.
- Genera economía favorable en los países.

2.3. CONCEPTOS DEL RECICLAJE DE PAVIMENTOS

Según Montejo, (2005), se entiende por reciclaje de pavimentos, la reutilización de materiales que forman parte de alguna de las capas estructurales de pavimentos existentes y que han cumplido su finalidad inicial, mediante la transformación de un pavimento degradado en una estructura homogénea y adaptada al tráfico que debe soportar.

Las técnicas y metodologías que se han desarrollado para el reciclaje de pavimentos obedecen, tal como la evolución de la ciencia en el tema básico de la teoría general de pavimentos, a conceptos empíricos y a comprobaciones de campo por medio de experimentaciones directas, es decir, que los postulados principales se han obtenido a raíz de procedimientos de ensayo y error.

Los tratamientos utilizados parten de un principio físico-mecánico esencial que consiste en la buena gradación del material existente como residuo, puesto que ese material ya sufrió los procesos de selección, clasificación y trituración, que lo hicieron apto para la producción de materiales que conforman las estructuras de pavimento (bases granulares y mezclas asfálticas). Por otra parte, se fundamentan en principios químicos que trabajan sobre el ligante asfáltico presente en los residuos o escombros de pavimentos, que aunque envejecido y de cantidad variable, puede ser reutilizado con la ayuda de aditivos químicos,

agentes rejuvenecedores o complementado con la acción de emulsiones asfálticas o crudos pesados tratados.

“Un pavimento asfáltico reciclado (RAP: Reclaimed Asphalt Pavement) es el término dado a materiales de pavimento extraídos y/o procesados de nuevo, los que se conforman de cemento asfáltico y agregados pétreos. La forma común de su utilización es incorporarlo al diseño de una nueva mezcla asfáltica”.

2.3.1. Las ventajas de la utilización de pavimento reciclado

Son múltiples, entre ellas se destacan las siguientes consideraciones:

Reutilización de material.

Disminución del volumen de botaderos.

Reducción de costos en pavimentación.

Ahorro en importación y extracción de materia prima (asfalto y áridos).

Conservación de suministro de material virgen.

Disminución en los tiempos de intervención en el camino.

Disminución en las importaciones de los productos asociados a la obra (disminución del porcentaje de cemento asfáltico).

2.4. CLASIFICACIÓN DE RECICLAJE EN CALIENTE

En los tratamientos de reciclado en caliente se pueden establecer dos grandes divisiones:

Tratamiento en caliente in situ, con las siguientes tecnologías: termoreperfilado termoregeneración y termoreciclado

Tratamiento en caliente en planta, mezclas con adición de RAP.

2.4.1. Reciclado en caliente in situ

La técnica de reciclado in situ de materiales asfálticos fue concebida en los Estados Unidos en el año 1956 e introducida en Europa hacia el año 1970. Consiste en la conservación de firmes bituminosos degradados que se reutilizan directamente, con o sin aportación de

materiales nuevos, mezclándolos in situ y posteriormente extendiendo y compactando la mezcla para constituir una nueva capa de firme.

Los procesos de reciclado in situ son de aplicación cuando no se trata de corregir problemas de insuficiencia estructural sino problemas en capas superficiales como son los debidos a envejecimiento del ligante, pulimento de los áridos, pérdida de textura, etc.

Aunque algunas de estas técnicas permiten dotar al firme de una cierta capacidad de refuerzo, el espesor de tratamiento se limita a unos 8 cm como máximo, por lo que su campo de aplicación va más encaminado hacia la renovación de las características superficiales del pavimento.

El reciclado en caliente in situ se realiza con unos equipos especiales provistos de calefactores que elevan la temperatura de la superficie del firme y facilitan la disgregación del material, siendo el elemento básico del equipo el escarificador o fresador-calentador.

Generalmente, el calentador consiste en unos paneles de rayos infrarrojos que calientan la superficie a temperaturas que oscilan entre 120 °C y 160 °C. Suele haber una serie de paneles que precalientan la superficie y eliminan la humedad, y una o dos series (si se reciclan más de 2-3 cm ya que suele hacerse en dos etapas) que aplican la temperatura final.

El equipo de escarificado está provisto de dientes de acero con puntas de carburo, aunque a veces se utilizan fresadoras convencionales. El material disgregado se mezcla con un betún blando o un agente rejuvenecedor, pudiendo llevarse a cabo la técnica con o sin aportación de árido nuevo y realizando la operación de mezcla con el mismo equipo.

La extensión y compactación se realiza mediante equipos convencionales y debe realizarse lo más rápidamente posible ya que es el punto crítico de toda la operación.

Imagen 2.4:1. Maquinaria de tratamiento en caliente in situ



Fuente: Asociación Española de la Carretera, 2001

2.4.2. Reciclado en caliente en planta

Se entiende por reciclado de mezclas bituminosas en planta en caliente la reutilización de mezclas bituminosas retiradas de capas envejecidas mediante un tratamiento en una central de fabricación en caliente. En este tratamiento se añaden a las mezclas antiguas otros áridos y ligante nuevos y, a veces, un agente rejuvenecedor del ligante. El empleo de los materiales reciclados puede hacerse en el mismo firme de que proceden o en otra localización, debiendo cumplir las mezclas bituminosas fabricadas con estos materiales las mismas prescripciones exigidas a las mezclas bituminosas en caliente convencionales.

El proceso se realiza retirando las mezclas de la carretera en forma de bloques, extraídos con palas, martillos neumáticos o masas de caída libre, si se trata de la eliminación completa del conjunto de las mezclas. Mediante el fresado se retiran los materiales si sólo se quiere eliminar una parte de la capa bituminosa. El material retirado es trasladado a una central de fabricación de mezclas bituminosas en la que, después de un eventual proceso de machaqueo y de una clasificación granulométrica, se mezcla en caliente con áridos y ligantes nuevos, así como agentes rejuvenecedores, obteniéndose una mezcla bituminosa compuesta en parte por el material reciclado y destinada normalmente para capas inferiores y arcenes, aunque en ocasiones también para capa de rodadura.

2.4.2.1. Principios generales para su aplicación

Los principios generales aplicables a la técnica de reciclado en caliente en planta son los siguientes:

Las mezclas obtenidas por reciclado deben cumplir los mismos requisitos que las mezclas convencionales equivalentes. Esto es un parámetro limitativo en el contenido de RAP a adicionar debido a la falta de regularidad de éste.

Las características del ligante final de la mezcla deben estar en el rango o próximas al de los ligantes que serían aplicables en mezclas equivalentes con áridos nuevos. Ello puede suponer la utilización de betunes nuevos con una mayor penetración o con características regenerantes a medida que aumenta la proporción de RAP en la mezcla o con ligante del RAP muy envejecido. Asimismo, al aumentar la proporción de RAP, hay que ir disminuyendo la de ligante nuevo a añadir para mantener un contenido total de ligante adecuado.

Para un mezclado eficaz y reconstitución de la mezcla, el RAP debe alcanzar una temperatura suficientemente elevada para permitir la fluidificación del ligante viejo y su mezcla con el nuevo. En la práctica, esto se traduce en que debe alcanzar unas temperaturas en torno a 160 °C para las mezclas habituales en nuestro país.

En el calentamiento del RAP por transferencia de calor a partir de los áridos sobrecalentados, la temperatura de éstos no debe ser tan alta como para provocar un envejecimiento adicional del ligante por choque térmico.

2.5. RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN PLANTA Y EN CALIENTE

2.5.1. Descripción

Este trabajo consiste en el acopio y utilización de materiales disgregados de capas asfálticas de pavimentos en servicio o excedentes de una mezcla asfáltica no utilizada; la preparación de una nueva mezcla asfáltica en caliente mezclando dichos materiales con agregados pétreos y con cemento asfáltico nuevos y, de ser necesario, agentes

rejuvenecedores y otros aditivos; el eventual almacenamiento, el transporte, la colocación y la compactación de la nueva mezcla, de acuerdo con los alineamientos, cotas, secciones y espesores indicados en los documentos del proyecto o determinados por el Interventor.

2.5.2. Agregados recuperados del pavimento reciclado

Los agregados obtenidos mediante la disgregación de una mezcla asfáltica de un pavimento existente no deben mostrar signos de meteorización, y su calidad debe ser similar a la exigida para los agregados de adición.

Por ningún motivo se permite el empleo de materiales recuperados de pavimentos donde la capa asfáltica hubiera presentado deterioros de los tipos afloramientos de asfalto (exudación) o deformaciones plásticas.

El material que se va a reciclar debe ser homogéneo, no contener contaminantes y estar perfectamente caracterizado, siendo necesario que se someta a un proceso previo de trituración, eliminación de contaminantes y homogeneización.

Generalmente, los procesos de triturado en planta presentan una mejor consistencia y separación del RAP que las operaciones realizadas in situ. El RAP que ha sido bien separado y gradado presenta la máxima superficie específica que permitirá una dispersión uniforme del agente rejuvenecedor además de una fácil extensión y la consecución de la densidad de compactación requerida.

2.5.2.1. Material bituminoso de la mezcla por reciclar

El material bituminoso proveniente de la capa disgregada o del excedente de una mezcla nueva, debe ser susceptible de mezclar de manera homogénea con el material bituminoso de adición, de manera de obtener, con la incorporación de un agente rejuvenecedor si se requiere, un producto de características similares a uno de los cementos asfálticos.

2.6. AGENTE REJUVENECEDOR PARA MEZCLAS CON PAVIMENTO RECICLADO

En caso de que se requiera, el agente rejuvenecedor debe ser un material orgánico cuyas características químicas y físicas permitan devolverle al asfalto envejecido las condiciones necesarias para el buen comportamiento de la nueva mezcla, según lo contemplen las especificaciones particulares del proyecto. La dosificación y la dispersión homogénea del agente rejuvenecedor deben seguir las recomendaciones de su fabricante y ser aprobadas por el Interventor.

El grado de envejecimiento de un betún de pavimento depende de factores climatológicos y de tráfico en procesos de larga duración y de fabricación y puesta en obra en procesos de corta duración. Normalmente, cuando se quiere reciclar un pavimento, es debido a que se encuentra fatigado estructuralmente y esto supone, salvo que haya sucedido alguna catástrofe natural, que el ligante se encuentra alterado después de un largo tiempo de exposición a agentes externos.

Donde el punto de vista químico, el envejecimiento del betún es un proceso que altera su composición y su estructura coloidal manifestándose en la práctica en un endurecimiento y una pérdida de sus características mecánicas y aglomerantes. Es un proceso irreversible que comienza con la fabricación de la mezcla bituminosa en la planta asfáltica y que continúa después de la puesta en carretera durante su vida de servicio.

Durante el proceso de mezcla con los áridos en la planta asfáltica, el betún sufre un acusado envejecimiento. Aunque este proceso sea de corta duración, su efecto es crítico cuando se pone el betún en contacto con el oxígeno y con los áridos a temperaturas elevadas (del orden de 170 °C), y en espesores de película muy finos. En esta etapa se produce la evaporación de los posibles componentes volátiles presentes en el betún, lo cual puede provocar pérdidas de hasta un 30 % en la penetración del betún.

Los agentes rejuvenecedores acostumbran a ser aceites ligeros, de alta penetración y baja viscosidad. Normalmente son productos patentados, pero pueden también estar formados por mezclas de betunes, emulsiones o betunes modificados de baja viscosidad,

escogiéndose en función de sus propiedades reológicas. Normalmente, los productos de marcas comerciales están en forma emulsionada o en aceites en fase no emulsionada, compuestos por fracciones maltenas y asfaltenas seleccionadas derivadas del crudo.

Los agentes rejuvenecedores son usados en el reciclado de mezclas bituminosas para restaurar las propiedades de la mezcla a su estado original fluidificando la mezcla oxidada, reduciendo la fragilidad y aumentando la durabilidad y trabajabilidad del pavimento rehabilitado.

2.6.1. Uso del aceite quemado de motor en mezclas asfálticas con pavimento reciclado como agente rejuvenecedor

Las mezclas con aceites de tipo orgánico requieren menores cantidades del mismo, en comparación con aceites derivados del petróleo, sin embargo, y de acuerdo con los mismos autores, una investigación más amplia, que incluya RAP de diferentes fuentes, así como un análisis estadístico más profundo, es necesaria para validar los resultados obtenidos.

A pesar que el desempeño del aceite quemado de motor como agente rejuvenecedor es menor comparado con aceites de origen orgánico (mayores valores de módulo resiliente, menor tolerancia a bajas temperaturas y pérdida de masa por evaporación de compuestos volátiles), el hecho que sea de origen reciclado lo convierte en una opción interesante para su uso en mezclas con RAP.

Actualmente existen dos revisiones con respecto al uso del RAP y aceite quemado de motor (además de otros agentes rejuvenecedores) en mezclas asfálticas, discutiendo por una parte usos de RAP y su capacidad para usar en reciclaje junto con aceite quemado de motor como agente rejuvenecedor (Dhananjay et al., 2016) obteniendo los siguientes resultados:

Al aumentar el porcentaje de asfalto envejecido hay un aumento significativo en la rigidez, viscosidad y temperatura crítica de la mezcla.

El uso de RAP produce aproximadamente un 78 % de reducción en el contenido óptimo del ligante utilizado en los proyectos de carreteras.

El uso de aceite quemado de motor como agente de reciclaje con RAP ayuda a mejorar sus propiedades a baja temperatura y propiedades físicas (Ductilidad, punto de ablandamiento, viscosidad, rigidez, etc.)

El uso del RAP reduce los costos de construcción ya que su adición a mezclas asfálticas muestra mejores resultados que el de las mezclas con material virgen.

Según la Administración Federal de Carreteras (EEUU), 73 millones de toneladas de pavimento de asfalto recuperado se reutilizan cada año. Esto es casi el doble que el papel, el vidrio, el aluminio y los plásticos combinados.

El reciclaje de asfalto beneficia al medio ambiente de muchas maneras. En particular, reduce la explotación de canteras, la minería y el consumo de petróleo.

El reciclaje de asfalto también reduce drásticamente el consumo de recursos tales como combustible, maquinaria, transporte y mano de obra en comparación con la producción de materiales de asfalto virgen.

2.7. MATERIALES DE APORTACIÓN PARA LA MEZCLA CON RAP

La calidad de los materiales de aportación corrige las deficiencias del material a reciclar, de manera que la mezcla final presente características que se sitúen dentro de las tolerancias admitidas para las mezclas totalmente nuevas. Deben agregarse áridos vírgenes a la mezcla debido a las siguientes razones:

Mejora de la granulometría el pavimento existente puede no tener la granulometría deseada o, aunque fuese así, ésta puede cambiar durante su proceso de demolición. De esta manera, añadir nuevos áridos permite la mejora en la gradación de la mezcla reciclada modificándola hasta conseguir un rango aceptable.

Calidad de los áridos, aunque la granulometría fuese adecuada, puede suceder que la calidad de los áridos en la mezcla original no sea la óptima. Por ejemplo, una excesiva presencia en el RAP de áridos rodados debido a su economía puede ser corregida mediante la adición de nuevos áridos.

Exceso de filler en el RAP, el pavimento del cual se obtiene el RAP contiene originalmente una cantidad de filler igual o superior a la permitida en normativas actuales, incrementándose normalmente durante el proceso de demolición. Por ello se hace

necesario limitar la cantidad de filler en los áridos vírgenes mediante su lavado facilitando así su control en la mezcla final.

Ligante, el envejecimiento del ligante del RAP hace necesario su modificación durante la fabricación de la mezcla. Si no se añaden nuevos áridos, la adición de nuevo ligante o de agentes rejuvenecedores hace que la mezcla resultante fuese muy rica (con un elevado contenido de ligante).

Control de emisión de contaminantes, aunque ha sido un problema clásico en las plantas asfálticas de tambor secador-mezclador en las que el RAP está en contacto con la llama del tambor, los nuevos sistemas de fabricación han evitado este problema debido a que la presencia de áridos vírgenes en el proceso de producción de la mezcla crea un escudo que impide el contacto directo de la llama con el RAP y favorece que el ligante no se encienda y no emita humos contaminantes.

2.8. MATERIAL PROVENIENTE DEL PAVIMENTO RECICLADO

El material a reciclar consiste normalmente en capas bituminosas que ha sido fresada en un espesor predeterminado y transportadas a los acopios de la planta asfáltica. El RAP es triturado o tamizado hasta un tamaño máximo de 14-20 mm, produciéndose durante el proceso la disgregación en sus componentes originales y la rotura de algunas partículas de las fracciones más gruesas. Este último aspecto provoca una falta en el tamaño máximo del árido y un incremento de los tamaños inferiores, no habiendo en principio un aumento significativo de finos.

El material disgregado por reciclar puede provenir de la misma obra o encontrarse almacenado por haber sido extraído en otro lugar.

Generalmente, los procesos de triturado en planta presentan una mejor consistencia y separación del RAP que las operaciones realizadas in situ. El RAP que es bien separado y gradado presenta la máxima superficie específica que permitirá una dispersión uniforme del agente rejuvenecedor además de una fácil extensión y la consecución de la densidad de compactación requerida.

La calidad del RAP es un concepto importante a considerar en el reciclado de mezclas bituminosas y depende de los siguientes factores:

La oxidación de la mezcla que provoca endurecimiento y pérdida de ductilidad.

El desgaste y la erosión de los áridos.

Las deficiencias de la mezcla inicial en variables como el contenido de betún o la distribución granulométrica de los áridos.

Debe remarcarse que no todo el RAP es adecuado para ser reciclado o para todas las aplicaciones. Las mezclas con contenido de goma, por ejemplo, no son adecuadas para el reciclado a elevadas temperaturas. Por otra parte, la calidad original de los áridos (por ejemplo partículas redondeadas) o su estado (por ejemplo partículas con elevado pulimento) pueden no hacerlo adecuado en el tratamiento de la capa originaria aunque puede utilizarse en mezclas destinadas a capas inferiores.

La variabilidad en la granulometría del RAP puede llegar a hacerlo no adecuado para reciclar o al menos dificultar el diseño de la mezcla reciclada. El principal factor a tener en cuenta es la cantidad de filler y su efecto en la dispersión de la nueva mezcla. Es por ello que deben añadirse nuevos áridos para corregir dichas deficiencias como parte integrante del proceso de diseño, especialmente los correspondientes a las fracciones más gruesas.

2.8.1. Acopio del material por reciclar

Los acopios del material para reciclar deben estar cubiertos y el tiempo de almacenamiento se deberá reducir al mínimo posible para evitar que absorban una cantidad de agua excesiva de la atmósfera.

En el instante de ser descargados en el acopio los materiales por reciclar, se deben descartar todos aquellos que, a simple vista, presenten contaminaciones.

En las regiones donde la temperatura ambiente exceda de treinta grados Celsius (30 °C), los acopios del material por reciclar no podrán tener una altura mayor de tres metros (3 m) para evitar que el material se aglomere.

Los acopios del material por reciclar, después de tratado, se deben situar en una zona bien drenada y, en caso de que la superficie no sea pavimentada, no se pueden emplear los quince centímetros (15 cm) inferiores de ellos. En las regiones donde la temperatura ambiente exceda de treinta grados Celsius (30 °C), los acopios del material por reciclar, después de tratado, no podrán tener una altura mayor de tres metros (3 m) para evitar su aglomeración.

2.8.2. Tratamiento del material por reciclar

El material disgregado por reciclar se deberá tratar y mezclar para su homogeneización y descontaminación. Para ello, será necesario triturar todos los bloques, de manera que todo el material pase por el tamiz de 25 mm (1”) de abertura.

Se deberá proceder, también, a la eliminación de cualquier contaminante y, en especial, se usará un procedimiento adecuado para la detección y el retiro de elementos metálicos.

Posteriormente, el material debe ser mezclado hasta obtener un producto homogéneo y sin segregaciones.

2.9. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

El diseño de mezclas asfálticas, así como el diseño de otros materiales de ingeniería, consiste principalmente en seleccionar y hacer proporciones de los componentes, para obtener las propiedades deseadas o especificadas en la construcción. El objetivo general para el diseño de mezclas asfálticas, es el determinar cada componente de la mezcla asfáltica, y el asfalto que resulte en una mezcla económica que tenga:

- Suficiente asfalto para asegurar durabilidad.
- Suficiente estabilidad para satisfacer las demandas de tráfico sin distorsión o desplazamientos.

- Suficiente manejabilidad para permitir la colocación de la mezcla sin segregación.
- Los materiales propuestos a usarse satisfagan los requisitos de las especificaciones del proyecto.
- Las combinaciones de agregados satisfagan la granulometría requerida en las especificaciones.
- Las gravedades específicas de masa de todos los agregados usados y la gravedad específica del asfalto sean determinados para poderse usar en los análisis de densidad y vacíos.

Estos requerimientos son materia de pruebas de rutina, especificaciones y técnicas de laboratorio que deben ser considerados, pero que no son técnicas para cualquier método de diseño en particular. Por lo que existen varios métodos de diseño de mezclas, en nuestro caso solo hablaremos del método Marshall que por su accesibilidad a los equipos y por ser el más usado en el país.

2.9.1. Demanda de asfalto para la combinación de agregados

Puede determinarse por el ensayo CKE (Equivalente Centrífugo de Kerosene) o estimarse con la fórmula empírica:

$$Pc = 0.035 a + 0.045 b + K c + F$$

Donde:

Pc = Porcentaje de asfalto por peso de la mezcla total.

a = Porcentaje de agregado, mayor a 2,36 mm (N° 8).

b = Porcentaje de material entre 2,36 mm y 75 μm (N° 8 y N° 200).

c = Porcentaje de partículas menores a 75 μm (N° 200).

K = 0,15 si el porcentaje inferior a 75 μm está entre 11 y 15; 0,18 si su porcentaje está entre 6 y 10; 0,20 si es menor o igual a 5.

F = Varía entre 0 y 2 % de acuerdo a la absorción del agregado. La fórmula se basa en un peso específico promedio de 2,60 a 2,70. Si no se dispone información, se puede tomar un valor de 0,7 a 1,0 rango dentro del cual se encuentran la mayoría de los casos.

2.9.2. Porcentaje de asfalto nuevo en la mezcla

La cantidad de asfalto nuevo por adicionar en las mezclas recicladas es igual a la demanda total, menos el porcentaje de asfalto del pavimento asfáltico recuperado.

$$Pr = Pc - Pa * \frac{Pp}{100}$$

Donde:

Pr = Porcentaje de asfalto nuevo en la mezcla reciclada.

Pc = Porcentaje de asfalto por peso de la mezcla.

Pa = Porcentaje de asfalto en la mezcla recuperada del pavimento.

Pp = Porcentaje en que interviene el pavimento asfáltico recuperado dentro de la mezcla reciclada.

Si se requiere expresar el porcentaje de asfalto como porcentaje con respecto al peso de los agregados:

$$Pa = \frac{100 * Pr}{100 - Pr}$$

Tanteos de diseño de la mezcla y selección de la fórmula de trabajo

Se hacen tanteos utilizando el método Marshall. El contenido de asfalto se puede ajustar cambiando la cantidad de asfalto nuevo, hasta llegar a una mezcla que cumpla con el criterio del procedimiento de diseño utilizado.

2.9.3. Propiedades consideradas en el diseño de mezclas

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente. Estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclar es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades. Por lo tanto, hay que saber que significa cada una de estas propiedades, cómo es evaluada, y que representa en términos de rendimiento del pavimento.

2.9.3.1. Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado.

Tabla 2.9.1. Causas y efectos de la inestabilidad en el pavimento

Causas	Efectos
Exceso de asfalto en una mezcla	Ondulaciones, ahullamientos y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahullamiento y canalización.

Fuente: Instituto de Asfalto

2.9.3.2. Durabilidad

La durabilidad de un pavimento es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto (polimerización y

oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada en tres formas. Estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

La mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas. En consecuencia, el asfalto retiene, por más tiempo, sus características originales. Además el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Por supuesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos.

Una graduación densa de agregado firme, duro, a la separación, contribuye, de tres maneras, a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas del agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento.

La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos como la cal hidratada. La intrusión del aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darla al pavimento la máxima impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos con una poca durabilidad del pavimento.

Tabla 2.9.2. Causas y efectos de una poca durabilidad

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfaltos	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o la falta de compactación.	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración.
Agregados susceptible al agua (Hidrofilitos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado, o desintegrado

Fuente: Instituto de Asfalto

2.9.3.3. Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relaciona con impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es muy importante que su cantidad. El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento. Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.

Tabla 2.9.3. Causas y efectos de la permeabilidad

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

Fuente: Instituto de Asfalto

2.9.3.4. Trabajabilidad

La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría.

Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino, y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla más trabajable. En tal caso se debe tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modificada cumpla con los otros criterios de diseño, tales como contenido de vacíos y estabilidad.

Un contenido demasiado alto de relleno también puede afectar la trabajabilidad. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación.

La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo alrededor de tapas de alcantarillados, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares. Es muy importante usar mezclas trabajables en dichos sitios.

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente.

Usualmente son el producto de una falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano, partículas lisas y redondeadas de agregado, y/o demasiada humedad en la mezcla.

Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, si tienen algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad el asfalto, una temperatura demasiado baja hace que la mezcla sea poco

trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta puede hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

Tabla 2.9.4. Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad

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

Fuente: Instituto de Asfalto

2.9.3.5. Flexibilidad

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

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

2.9.3.6. Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga

del pavimento. (El periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles.

Tabla 2.9.5. Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga.
Vacíos altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de comparación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.

Fuente: Instituto de Asfalto

2.9.3.7. Resistencia al deslizamiento

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie este mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo). La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento, y a una velocidad de 65 km/hr (40 mi/hr).

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tiene mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9,5 mm (38

pulgadas) a 12,5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados debe resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimiento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

Tabla 2.9.6. Causa y efectos de poca resistencia al deslizamiento

Causas	Efectos
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidropilado
Agregado pulido en mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

Fuente: Instituto de Asfalto

2.10. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS EN CALIENTE

De una manera general, el diseño de una mezcla asfáltica consiste en seleccionar el tipo y la granulometría de los áridos a utilizar además del tipo y contenido de ligante, de manera que se cumplan los requerimientos específicos del proyecto.

La selección apropiada de los componentes de la mezcla y sus proporciones requieren un conocimiento de las propiedades más significativas de las mezclas bituminosas.

Algunas de estas propiedades se contraponen en cierta manera debido al comportamiento reológico de las mezclas, cuya respuesta depende de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. Así, a temperaturas bajas y/o tiempo de aplicación de carga muy corto, la respuesta de la mezcla es visco-elástica, mientras que a temperaturas altas y/o tiempo de aplicación de carga largo, la mezcla se comporta como un material visco-plástico.

El diseño de las mezclas recicladas no sólo se reduce, como habitualmente sucede, a la determinación del contenido de RAP y ligante a añadir. Ésta es sólo la última fase a

estudiar de un proceso más amplio que permitirá garantizar el adecuado comportamiento de la mezcla y una optimización económica de la solución.

2.10.1. Dosificación

Los procedimientos de dosificación tienen por objeto determinar las proporciones más adecuadas en las que han de formar parte de la mezcla los áridos, el filler y el betún. Existen procedimientos de mayor alcance con los que se pretende caracterizar el comportamiento reológico de la mezcla y en definitiva determinar módulos y leyes de fatiga para diferentes estados tensionales y temperaturas con objeto de disponer de parámetros para el dimensionamiento.

Dentro de los métodos que estrictamente sirven para dosificar, se pueden establecer dos familias. Por un lado, los métodos basados en la determinación directa o indirecta de la superficie específica de los áridos y, por otro, los basados en la realización de ensayos mecánicos generalmente de base empírica.

Los métodos de superficie específica se basan en una estimación, a partir de la granulometría del árido, de cuál es la superficie mineral a envolver, escogiéndose un espesor de la película de betún en función del destino de la mezcla. Son métodos sencillos y rápidos, pero tienen el inconveniente de su imprecisión. Entre estos métodos, todos ellos similares, se puede citar el CKE (Equivalente Centrífugo de Keroseno)

Independientemente del tipo de ensayo, la forma de proceder es en general la misma. En primer lugar, se debe seleccionar el tipo de mezcla a diseñar basándose en los mismos criterios que las mezclas convencionales en caliente. Una vez caracterizados los materiales y conocido el tipo de mezcla bituminosa reciclada a diseñar, se ha de obtener la fórmula de trabajo. Este proceso es iterativo, comenzando por la dosificación del RAP y los áridos de aportación de forma que se obtenga una granulometría dentro del huso correspondiente.

Posteriormente debe analizarse el efecto del contenido de betún nuevo añadido sobre las propiedades de la mezcla; si esto no se consigue, debe volverse a comenzar el proceso cambiando alguna de las variables hasta obtener la fórmula de trabajo proyectada.

Dosificación de los áridos y del RAP

Las variables de las cuales se parte para su dosificación son la granulometría de los áridos del RAP, el contenido de betún del RAP y la granulometría de los áridos vírgenes. Se determinan las proporciones de cada uno de los áridos para obtener una granulometría combinada que se encuentre dentro del huso escogido, considerándose que todo el árido procedente del RAP actúa en su totalidad, es decir, como si fuese un árido virgen. Para comenzar, normalmente se parte del porcentaje de RAP que se quiere añadir a la mezcla.

La norma Colombiana de INVIAS en su ARTICULO 462-13 (Reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente) nos indica que el material por reciclar no deberá constituir más del cuarenta por ciento (40 %) de la masa total de la mezcla. La determinación del tipo y de la proporción del agente rejuvenecedor para reciclado por incorporar en la mezcla se deberá realizar según los ensayos y resultados.

2.10.2. Recuperación del pavimento reciclado

El proceso comienza con la recuperación de los materiales de firmes para su posterior reciclado en caliente en planta. Los pasos a efectuar son los que se explican a continuación:

Demolición del pavimento, para la demolición del pavimento se emplean dos tipos de técnicas que permitirán obtener un material de características diferentes en cada caso. Este hecho condicionará el postproceso a seguir para un óptimo aprovechamiento posterior en los procesos de reciclado en planta.

Demolición mecánica

Las capas de firme se ripean con un bulldozer o se levantan con una pala o retroexcavadora generándose un material troceado en bloques que presenta una heterogeneidad de tamaños. Se trata de una técnica usada normalmente en demoliciones en las que no existen requisitos precisos de reutilización posterior o de saneamiento de un determinado espesor del firme mediante fresado. De esta forma, si se quiere utilizar en procesos de reciclado, es necesario un tratamiento posterior de machaqueo con la finalidad de obtener una granulometría adecuada.

Fresado

El fresado, es una técnica necesaria cuando se retira un cierto espesor de firme con el fin de dejar una superficie plana y regular para un extendido posterior de nuevas capas de firme.

La granulometría del material fresado, es función de las características, el espesor y el estado de la capa a fresar, el tipo de fresadora y la velocidad de avance de la misma. Si no se consigue que el material fresado cumpla las características que se exigen al RAP, hace falta un postproceso de machaqueo o de clasificación previo al de reciclado al igual que en la demolición mecánica.

Caracterización del RAP

Suponiendo que no existen limitaciones tecnológicas, el porcentaje de RAP utilizado viene condicionado por las dispersiones en el contenido de ligante y en la granulometría de los áridos.

Si el RAP a utilizar es de procedencia diversa (como suele pasar en plantas fijas), sería necesario llevar a cabo un control riguroso de la procedencia y apilar el material por separado para evitar estas acusadas variaciones, aunque estas medidas son difícilmente viables.

En obras específicas de rehabilitación, con una procedencia de RAP única y controlada, tampoco se puede asegurar que no existan grandes dispersiones debido a la presencia de refuerzos y reparaciones locales. La solución sería realizar un fresado selectivo, pero resulta poco factible.

2.11. CRITERIOS DE DISEÑO NORMALIZADO

Para el diseño de mezclas asfálticas, deben cumplir con la caracterización mediante ensayos establecidos por las normas AASHTO y ASTM, como se muestra en las siguientes tablas:

Ensayos de laboratorio agregados

Granulometría Norma AASHTO T27; ASTM C 136

Desgaste de los ángeles Norma AASHTO T96; ASTM C 131

Equivalente de arena Norma AASHTO T176; ASTM D2419

Gravedad específica y absorción del agregado gruesos y finos Norma AASHTO T84; AASHTO T85; ASTM C 127; ASTM C 128.

Peso unitario y vacío norma AASHTO T19; ASTM C2M.

Ensayo de laboratorio para asfaltos

Viscosidad norma AASHTO 201

Penetración norma AASHTO T49; ASTM D5

Punto de inflamación, norma AASHTI T48; ASTM D92

Ductilidad, norma AASHTO T51; ASTM D113

Peso específico, norma AASHTO T228; AASHTO T85; AASHTO T84

2.11.1. Requisitos del agregado pétreo

2.11.1.1. Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa

Tabla 2.11.1. Características de los agregados

Características	Valor
Densidad relativa, mínimo	2,4
Desgaste de los ángeles, %	35
Partículas alargadas y lajeadas, % máxima	40
Equivalente de arena, % mínimo	50
Perdida de estabilidad por inmersión en agua, % máximo	25

Fuente: SCT, 2003.

2.11.1.2. Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa

Malla		Tamaño				
Abertura mm	Designación pulg	12,5 mm	19 mm	25 mm	37,5 mm	50 mm
		1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"
50	2"	-	-	-	-	-
37,5	1 1/2"	-	-	-	100	90-100
25	1"	-	-	100	90-100	76-90
19	3/4"	-	100	90-100	79-92	66-83
12,5	1/2"	100	90-100	76-89	64-81	53-74
9,5	3/8"	90-100	79-92	67-82	56-75	47-68
6,3	1/4"	76-89	66-81	56-71	47-58	36-59
4,75	N° 4	68-82	59-74	50-64	42-58	35-53
2	N° 10	48-64	41-55	36-64	30-42	26-38
0,85	N° 20	33-49	28-42	25-35	21-31	19-28
0,425	N° 40	23-37	20-32	18-27	15-24	13-21
0,25	N° 60	17-29	15-25	13-21	11-29.	9-16.
0,15	N° 100	12-21.	11-18.	9-16.	8-14.	6-12.
0,075	N° 200	7-10.	6-9.	5-8.	4-7.	3-6.

Fuente: SCT, 2003.

2.11.2. Requisitos del ligante asfáltico

Tabla 2.11.2. Requisitos de calidad para cemento asfáltico

N°	Características	Detalle		Exigencia
		AASTHO	ASTM	
1	Penetración a 25 °C	T-49-97	D-5	85-100
2	Vaso abierto Cleveland punto de inflamación °C	T-48	D92	>a 232 °C
3	Viscosidad saybol furol a 135 °C, seg.	T-72	D-102	>85 seg
4	Solubilidad en tricloro etileno %	T-44	D-2042	>a 99,00 %
5	Ductilidad 25 °C	T-51	D-113	>a 100 cm
6	Ensayo de horno película delgada	T-179	D-1757	<a 1
7	Penetración del residuo de pérdida, x calentamiento % original	T-49	D-5	>a 50

Fuente: SCT, 2005.

Método de diseño Marshall

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del departamento de autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrollo un criterio de diseño de mezclas.

El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método modificado se desarrolló para tamaños máximo arriba de 38 mm (1,5"). Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar. El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½") y 102 mm (4") de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrolla a 60 °C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

Especificaciones de la metodología

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios que se discutirán en este capítulo. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto, para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4 %. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas. Si todos los criterios se

cumplen, entonces se tiene el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesita hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

Tabla 2.11.3. Criterios de diseño Marshall.

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y base		Carpeta y base		Carpeta y base	
Criterio de mezcla	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad, (N) y (lb)	3336		5338		8006	
	750	-	1200	-	1800	-
Flujo, (0,25 mm) (0,01 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: Instituto de Asfalto

Tabla 2.11.4 Valor de vacíos de agregado mineral

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje de diseño vacíos de aire		
mm	in	3	4	5
1,18	N° 16	21,5	22,5	23,5
2,36	N° 8	19	20	21
4,75	N° 6	16	17	18
9,5	3/8"	14	15	16
12,5	1/2"	13	14	15
19	3/4"	12	13	14
25	1,0"	11	12	13
37,5	1,5"	10	11	12

Fuente: Instituto de Asfaltos

2.12. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE CEMENTO ASFALTICO DEL RAP

Para el reciclaje de los materiales que componen la carpeta asfáltica de los pavimentos, es necesario extraer y recuperar el agregado y el asfalto de la mezcla de forma que conserven, en la medida que sea posible, sus propiedades originales. En laboratorio es común la

utilización de los siguientes ensayos: centrifugado, reflujo -con solventes- y horno de ignición -de incineración-. A continuación se dará una breve descripción de cada método.

2.12.1. Extracción con centrifuga (ASTM D2172, método A)

Este método contempla la extracción del asfalto de la mezcla y de núcleos de pavimento, con la ayuda de los solventes: tricloroetileno, bromuro de propilo normal, o cloruro de metileno. El contenido de asfalto se determina por diferencia de las masas del agregado extraído; el contenido de humedad y, materia mineral. Comúnmente es usado para determinar cuantitativamente el contenido de asfalto en la mezcla o el pavimento para la determinación de especificaciones, para la evaluación; control e investigación. En la imagen, se muestra el tazón de extracción que se utiliza en este método.

Imagen 2.12:1. Extractor centrifugo



Fuente: Elaboración propia

2.13. ACEITES LUBRICANTES

Los aceites lubricantes tienen entre sus funciones: no permitir la formación de residuos gomosos, no permitir la formación de lodos, mantener limpias las piezas del motor, formar una película continua y resistente y permitir la evacuación de calor. El aceite lubricante tanto para uso en automóviles e industrias, está compuesto en general (excepto en aceites sintéticos) por una base orgánica y aditivos, estos últimos utilizados para aumentar su rendimiento, eficiencia y vida útil. La composición de la base orgánica está formada de

cientos de miles de compuestos orgánicos, siendo la gran mayoría compuestos aromáticos polinucleares (PNA). Los aditivos de la base orgánica del aceite que pueden llegar a constituir hasta un 30 % en volumen del total de aceite virgen, típicamente contienen constituyentes inorgánicos como azufre, nitrógeno, compuestos halogenados y trazas de metales.

Base lubricante

Los aceites lubricantes están constituidos por una base lubricante la cual provee las características lubricantes primarias. La base lubricante puede ser base lubricante mineral (proveniente del petróleo crudo), base lubricante sintético o aceite base lubricante vegetal según la aplicación que se le va a dar al aceite.

Mobil Delvac MX 15W-40

Es un aceite de muy alto rendimiento para motores diésel que proporciona una excelente lubricación a los motores diésel modernos aumentando la vida del motor.

Tabla 2.13.1 Características típicas del aceite mobil delvac 15w40

Mobil Delvac MX 15W-40	
SAE Grade	15W-40
Viscosidad, ASTM D 445	
cSt @ 40°C	106
cSt @ 100°C	14.4
Índice de viscosidad, ASTM D 2270	140
Cenizas sulfatadas,% peso, ASTM D 874	1.3
TBN, mg KOH/g, ASTM D 2896	10
Punto de congelación, °C, ASTM D 97	-30
Punto de inflamación, °C, ASTM D 92	228
Densidad @ 15°C kg/l, ASTM D 4052	0.88

Fuente: Mobil Delvac MX 15W-40

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN

3.1. MATERIALES

Los materiales que se utiliza para el presente proyecto son agregados nuevos (grava, gravilla y arena), cemento asfáltico nuevo, con pavimento reciclable de una carretera y un aceite quemado de motor diésel.

3.1.1. Agregados

Los agregados a utilizar deben cumplir ciertas especificaciones de las normas ASTM y AASHTO. Para el presente proyecto utilizamos materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustan dentro de las normativas vigentes.

En la ciudad de Tarija se cuenta con varias plantas clasificadoras de áridos de ríos, pero se tomó en cuenta los áridos que utiliza la alcaldía del municipio con los que realizan también los asfaltados, para así tener la seguridad de la calidad de los mismo. Los agregados a usar son provenientes del acopio de material que tiene la alcaldía municipal de la provincia Cercado del departamento de Tarija que está ubicado en la Pintada.

Imagen 3.1:1. Banco de acopio de la alcaldía municipal.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.1:2. Grava y gravilla de la Pintada



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.1:3. Arena acopiada para las mezclas asfálticas



Fuente: Elaboración propia

Donde se obtuvo los tres materiales que se van a utilizar para la mezcla asfáltica nueva en caliente, que son: la grava de 3/4" gravilla de 3/8" y arena gruesa que pasa el tamiz N° 4. Materiales que son provenientes de la comunidad de Charaja y adquirida por la alcaldía ya que cumplen con las características que se pide.

Imagen 3.1:4.Grava 3/4” y gravilla 3/8”



Fuente: Elaboración propia

3.1.1.1. El cemento asfáltico

El asfalto utilizado en la elaboración de probetas en la presente investigación para la mezcla asfáltica convencional, fue cemento asfáltico STRATURA de Brasil C. A. 85 – 100.

3.1.1.2. Pavimento reciclado o también denominado RAP

La toma de muestra del RAP o pavimento reciclado fue recogido del departamento de Tarija, dentro la provincia Cercado, del barrio los Olivos, de sobre la calle Alemania que es una de las calles principales del barrio.

Imagen 3.1:5. Calle principal del barrio los Olivos



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.1:6. Extracción de pavimento reciclado mediante una cortadora, para así sacarla en trozos grandes.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.1:7. Muestras de los trozos grandes del pavimento reciclado



Fuente: Elaboración propia

3.1.1.3. Aceite quemado de motor

El aceite fue recolectado de una pala cargadora de motor a diésel el cual usa un aceite 15w40 de la marca móvil. Es importante resaltar que para la investigación este aceite no tuvo un excesivo uso por que se cambió según indicaba el fabricante.

Imagen 3.1:8 Aceite recolectado de la maquinaria



Fuente: Elaboración propia

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

3.2.1. Materiales nuevos de aportación

3.2.1.1. Granulometría ASTM D422 – AASHTO T88

Para la granulometría del agregado grueso grava de 3/4" y la gravilla de 3/8" se tomó una muestra de peso de 5000 gramos. Y se realizó tres ensayos en diferente toma de muestras para poder ver su homogeneidad del tamaño de sus partículas de la grava y gravilla. En cuanto a la arena también se realizó tres ensayos pero con muestras de 3000 gr.

Imagen 3.2:1. Pesado del agregado más los pesos de cada tamiz



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.2:2. Tamizado del agregado para luego pesar lo retenido en cada tamiz



Fuente: Elaboración propia

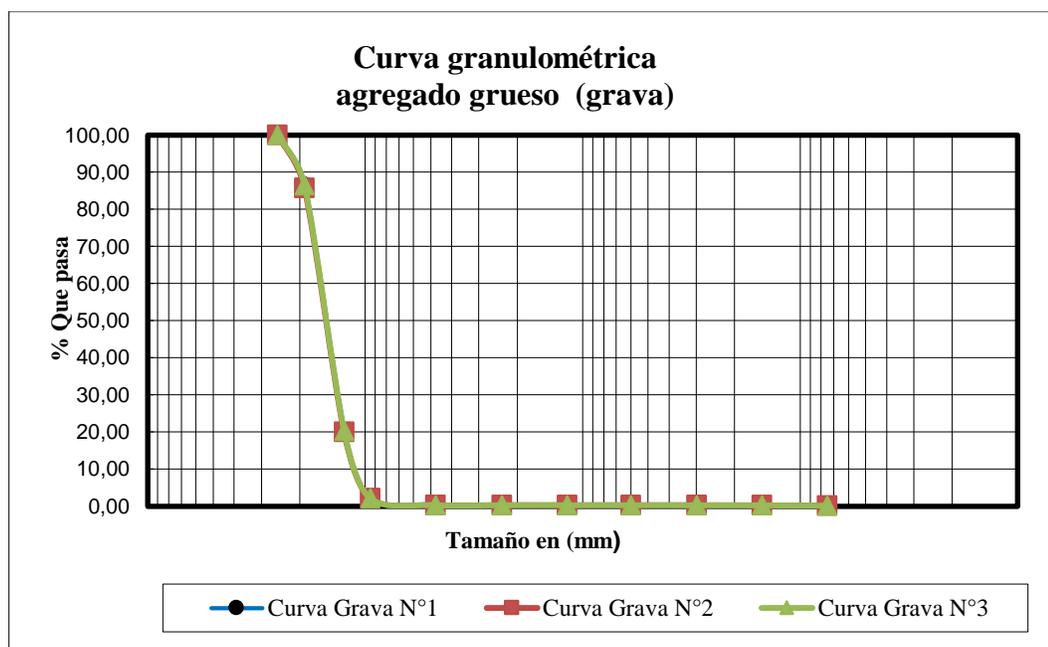
Resultados de las granulometrías

Tabla 3.2.1. Granulometría de grava del material de aportación

Peso total (gr.)			5000				
N° de Tamices	Tamaño (mm)	Peso retenido N°1.	% Que pasa del total	Peso retenido N°2.	% Que pasa del total	Peso retenido N°3.	% Que pasa del total
1"	25,40	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	662,20	86,76	716,40	85,67	675,75	86,49
1/2"	12,50	3318,10	20,39	3288,30	19,91	3310,65	20,27
3/8"	9,50	911,30	2,17	889,80	2,11	905,93	2,15
N° 4	4,75	95,80	0,25	91,20	0,29	94,65	0,26
N° 8	2,36	0,60	0,24	0,30	0,28	0,53	0,25
N° 16	1,18	0,20	0,24	0,40	0,27	0,25	0,25
N° 30	0,60	0,10	0,23	0,20	0,27	0,13	0,24
N° 50	0,30	0,20	0,23	0,10	0,27	0,17	0,24
N° 100	0,15	1,10	0,21	2,20	0,22	1,37	0,21
N° 200	0,075	3,80	0,13	4,60	0,13	4,00	0,13
BASE	-	6,40	0,00	5,80	0,01	6,25	0,01
Suma		4999,80		4999,30		4999,70	
Pérdidas		0,20		0,70		0,30	

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.2:1. Curva granulométrica del agregado (grava)



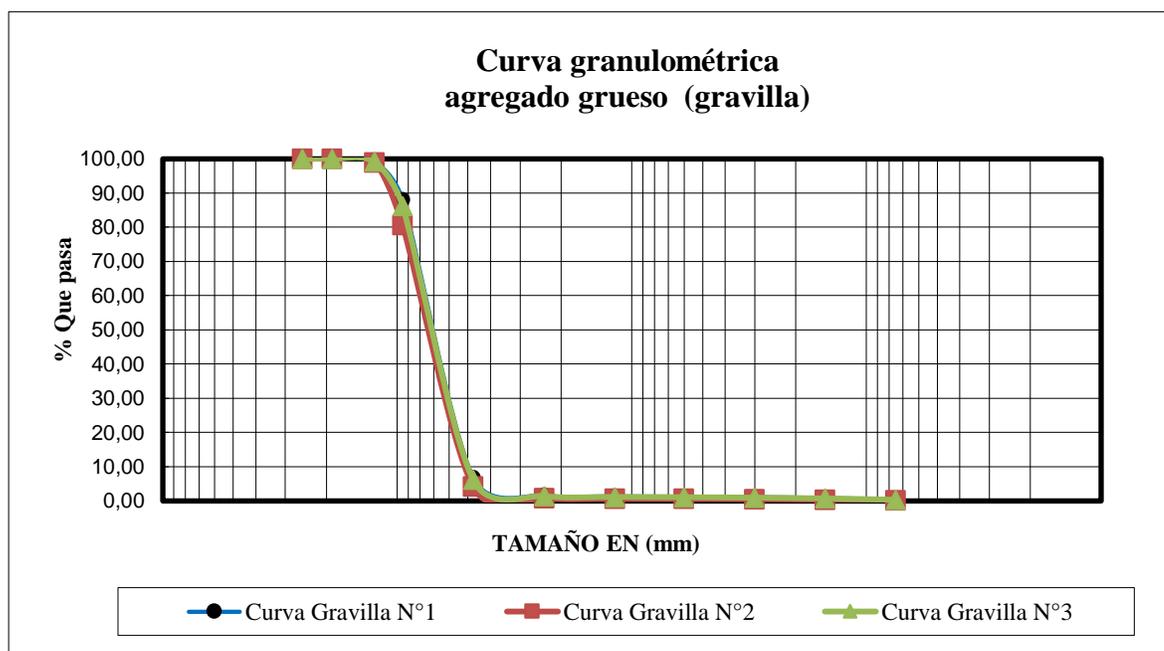
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2.2. Granulometría de la gravilla del material de aportación

Peso total (gr.)			5000				
N° de Tamices	Tamaño (mm)	Peso retenido N°1.	% Que pasa del total	Peso retenido N°2.	% Que pasa del total	Peso retenido N°3.	% Que pasa del total
1"	25,40	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	39,67	99,21	54,90	98,90	43,48	99,13
3/8"	9,50	560,33	88,00	919,20	80,52	650,05	86,13
N° 4	4,75	4060,17	6,80	3819,50	4,13	4000,00	6,13
N° 8	2,36	259,33	1,61	168,90	0,75	236,73	1,39
N° 16	1,18	14,67	1,32	7,90	0,59	12,98	1,14
N° 30	0,60	4,67	1,22	2,10	0,55	4,03	1,05
N° 50	0,30	7,17	1,08	3,90	0,47	6,35	0,93
N° 100	0,15	13,00	0,82	6,50	0,34	11,38	0,70
N° 200	0,075	23,33	0,35	8,00	0,18	19,50	0,31
BASE	-	16,67	0,02	7,90	0,02	14,48	0,02
Suma		4999,00		4998,80		4999,00	
Pérdidas		1,00		1,20		1,00	

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.2:2. Curva granulometría de agregado (gravilla)



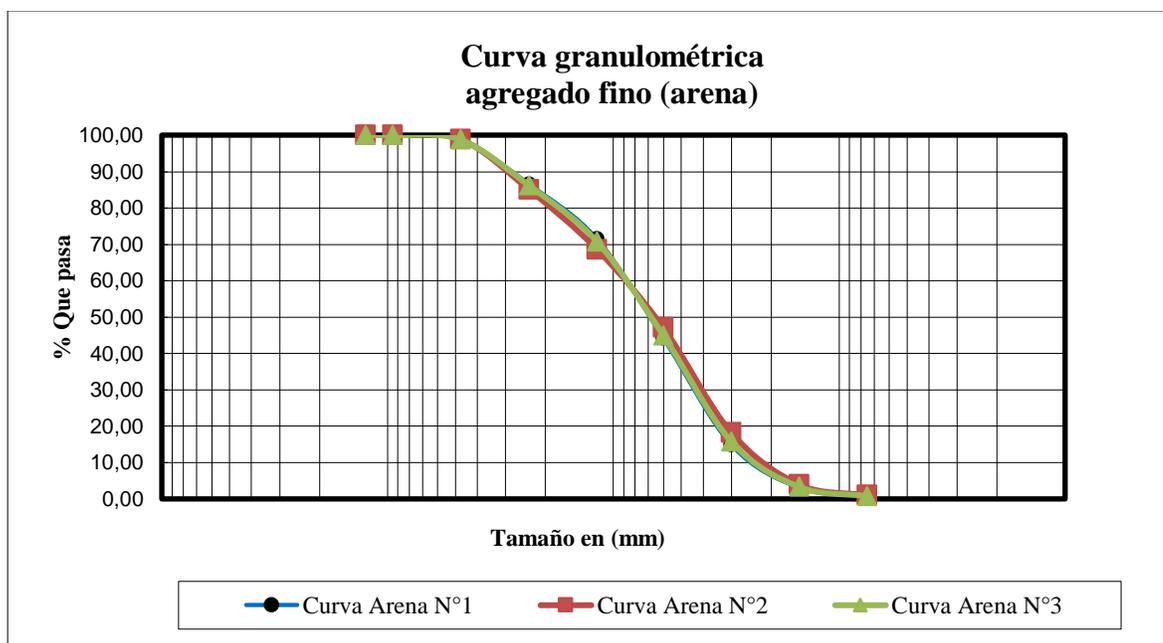
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2.3. Granulometría de arena del material de aportación

Peso total (gr.)			3000				
N° de Tamices	Tamaño (mm)	Peso retenido N°1.	% Que pasa del total	Peso retenido N°2.	% Que pasa del total	Peso retenido N°3.	% Que pasa del total
1/2	12,50	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100
0,375	9,50	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,0
N° 4	4,75	36,00	98,80	31,80	98,94	34,95	98,835
N° 8	2,36	367,80	86,54	416,40	85,06	379,95	86,17
N° 16	1,18	452,40	71,46	493,20	68,62	462,60	70,75
N° 30	0,60	816,54	44,24	646,20	47,08	773,96	44,95
N° 50	0,30	880,50	14,89	866,40	18,20	876,98	15,72
N° 100	0,15	354,30	3,08	428,40	3,92	372,83	3,29
N° 200	0,08	71,40	0,70	88,65	0,97	75,71	0,77
BASE	-	20,10	0,03	28,20	0,03	22,13	0,03
Suma		2999,04		2999,25		2999,09	
Pérdidas		0,96		0,75		0,91	

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.2:3. Curva granulométrica del agregado (arena)



Fuente: Elaboración propia

3.2.1.2. Peso específico del agregado grueso ASTM C-127

Se realizó el ensayo tres veces para un peso de 5 kg de diferentes muestras, tanto para la grava como para la gravilla.

Imagen 3.2:3. Pesado de muestra en balanza para el peso sumergido del agregado



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.2:4. Pesado del peso sumergido del agregado



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica para la grava

Tabla 3.2.4. Peso específico de la grava de aportación

Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
2,60	2,65	2,72	1,63
2,61	2,65	2,72	1,52
2,61	2,65	2,73	1,69
2,61	2,65	2,72	1,61

Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica para la gravilla

Tabla 3.2.5. Peso específico de la gravilla de aportación

Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% De absorción
2,54	2,60	2,71	2,50
2,55	2,61	2,71	2,41
2,56	2,62	2,71	2,26
2,55	2,61	2,71	2,39

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.3. Peso específico del agregado fino (arena) (ASTM C-128)

Para la obtención del peso específico del agregado fino se realizó tres ensayos del mismo material buscando en ambos la cantidad de humedad óptima del agregado fino.

Imagen 3.2:5. Humedad óptima de la arena y peso del matraz para el ensayo



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.2:6. Peso de la arena con humedad óptima, peso del matraz + agua + arena



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.2:7. Peso de muestra seca



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica para la arena

Tabla 3.2.6. Peso específico de la arena

Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
2,19	2,43	2,89	1,25
2,21	2,43	2,83	1,62
2,25	2,43	2,75	1,72
2,22	2,43	2,83	1,53

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.4. Ensayo de abrasión por medio de la máquina de los ángeles (ASTM C-131)

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.

Debido a las condiciones de esfuerzo deformación, la carga de la rueda es transmitida del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la subrasante.

Por esta razón los agregados que están en, o cerca de la superficie, como son los materiales de base y carpeta asfáltica, deben ser los más resistentes que los agregados usados en capas inferiores, como la sub base, de la estructura del pavimento, la razón se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito.

Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El ensayo de desgaste de los ángeles, ASTM C-131 (para

agregados menores de 1 ½”), mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o abrasión.

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5 mm (1 ½”), por medio de la máquina de los ángeles.

Resultados de la práctica

Imagen 3.2:8 Agregado grueso triturado por la máquina de los ángeles



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2.7 Desgaste de los ángeles

Agregado	Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
Grava	A	5000	3596,5	28,07	35% MAX
Gravilla	C	5000	3511,1	29,778	35% MAX

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.5. Equivalente de arena ASTM D 2419

El ensayo de equivalente de arena y agregados finos asigna un valor empírico a la cantidad relativa, figura y características del material fino que está presente en una muestra de ensayo granular que pasa el tamiz N° 4 (4.75 mm). El equivalente de arena es una relación de la altura de arena con arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje. Primeramente, se debe de tener una muestra del material y tamizarlo por el tamiz N° 4 para poder tener la muestra que se utiliza para este ensayo colocarlo en un recipiente.

Imagen 3.2:9. Material para el ensayo



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.2:10. Dosificación de químico especial



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.2:11. Agitación de la mezcla para evitar vacíos de aire



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.2:12. Arena total mente asentada para medir su altura



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

Tabla 3.2.8. Resultados del equivalente de arena

N° de muestra	H1	H2	Equivalente de arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9,8	10,60	92,45
2	9,9	10,70	92,52
3	10,1	11,10	90,99
		Promedio	91,99

$$E. A. = \frac{H_1}{H_2} * 100$$

Equivalente de arena (%)	Norma
91,99	> 50 %

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Caracterización del cemento asfáltico nuevo

La caracterización del cemento asfáltico se realiza con la finalidad de que el asfalto conseguido cumpla con las especificaciones que exige la norma de carreteras.

3.2.2.1. Ensayo de penetración (AASTHO T49-97); (ASTM D-5)

La penetración se define como la distancia, expresada en decimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25 °C durante un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil total. Incluida la aguja, de 100 gramos, aunque pueden emplearse otras condiciones previamente definidas. Es evidente que cuando más blando sea el betún asfáltico mayor será la cifra que indique su penetración.

Para realizar el diseño óptimo se realizó la evaluación y la caracterización del cemento asfáltico 85-100 los mismos que se detallan a continuación.

Imagen 3.2:13. Caracterización del cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.2:14. Taras a temperatura ambiente



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.2:15. Muestra en baño maría



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.2:16. Medición de la penetración



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

Tabla 3.2.9. Resultados del ensayo de penetración

Descripción		Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Penetración a 25 °C, 5 s AASHTO T-49	Lectura N° 1	mm	96,00	95,00	92,00
	Lectura N° 2	mm	87,00	92,00	97,00
	Lectura N° 3	mm	97,00	87,00	81,00
	Promedio	mm	93,33	91,33	90,00
Penetración promedio		mm	91,56		

Fuente: Elaboración propia

Calculo:

Realizando el promedio se tiene como valor de penetración de 91,56 mm a 25 °C, 5 s.

3.2.2.2. Ensayo punto de inflamación (AASHTO T-48) (ASTM D-92)

El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separa materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación del betún asfáltico indica la temperatura a que puede calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre. Esta temperatura es usualmente muy inferior a aquella a que el material ardería. Esta última temperatura se llama punto de fuego, pero rara vez se incluye en las especificaciones de los betunes asfálticos. Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de punto de inflamación se describen en el Método AASHTO T-18 y en el ASTM D-92.

Imagen 3.2:17.Cocinilla especial para calentar el C.A. y medir temperatura de inflamación



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

Tabla 3.2.10. Resultado del ensayo punto de inflamación.

Ensayo	Unidad	Ensayo 1
Punto de Inflamación AASTHO T-48	°C	>272
Numero de ensayos		3

Fuente: Elaboración propia

Calculo:

Realizando el cálculo de la media de los ensayos realizados.

Resultados: 272 °C.

3.2.2.3. Ensayo punto de ablandamiento (AASTHO T-53) (ASTM D-36)

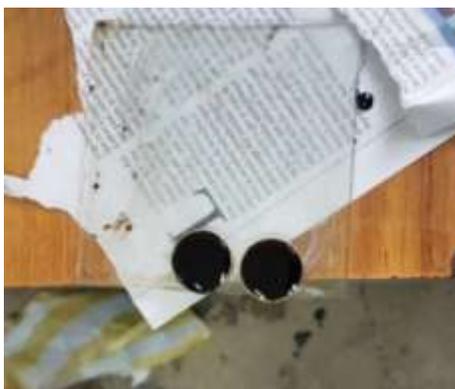
Este método describe un procedimiento para determinar el punto de ablandamiento de materiales asfálticos, cuyo valor se encuentra en el rango de 30 a 200 °C, por medio del aparato de anillo y bola.

Imagen 3.2:18. Materiales para el punto de ablandamiento



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.2:19. Vaciado de asfalto en moldes



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.2:20. Enfriamiento del cemento asfáltico para luego calentar.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2.11. Resultados de punto de ablandamiento

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2
Punto de ablandamiento	°C	44,00	47,00

Fuente: Elaboración propia.

Calculo:

Se realizó un promedio de ambas muestras obteniendo como resultado del ensayo 45,50 °C.

3.2.2.4. Ensayo peso específico del asfalto (AASHTO T-43) (ASTM D-70)

El peso específico de un material a la relación de su peso en el aire a una temperatura dada, al paso de un volumen igual de agua a la misma temperatura, a los 25 °C. El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas específicas. Así, un peso específico de 1,05 significa que el material pesa 1,05 veces lo que el agua a la temperatura fijada. Los aparatos y procedimientos para la realización de estos ensayos se detallan en los métodos AASHTO T-43 y ASTM D-70.

Imagen 3.2:21. Vaciado de asfalto en picnómetros para ponerlos en baño maría a 25 °C



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.2:22. Peso de muestra en balanza de precisión



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2.12. Resultados de peso específico

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 2
Peso picnómetro	gr	32,88	34,03	33,78
Peso picnómetro + Agua (25 °C)	gr	78,73	80,95	81,42
Peso picnómetro + Muestra	gr	69,67	70,54	70,36
Peso picnómetro + Agua + muestra	gr	79,27	81,38	81,88
Peso específico	gr/cm ³	1,012	1,009	1,010
Promedio	gr/cm ³	1,0103		

Fuente: Elaboración propia

Resultado:

El resultado final del peso específico del cemento asfáltico es el promedio de los tres ensayos realizados.

Peso específico del C.A. = 1.0103 gr/cm³

3.2.2.5. Ductilidad (AASHTO T51-00) (ASTM D-113)

La ductilidad de un material bituminoso es la medida de la distancia a la cual dos extremos de la briqueta de muestra se estiran, hasta que se rompa, es halado separándolos a una velocidad y temperatura especificada. Salvo indicación contraria, el ensayo se realiza a una temperatura de 25 ± 0.5 °C y a una velocidad de 5 cm/min \pm 5,0 %. A otras temperaturas la velocidad debe ser especificada. Los procedimientos y equipos a utilizar se describen con detalle en los métodos AASHTO T51 y ASTM D-113.

Imagen 3.2:23. Moldes llenados con asfalto para la ductilidad



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.2:24. Aparato de medición de la ductilidad



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.2:25. Medición de la ductilidad del cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Datos:

Tabla 3.31. Resultados del ensayo de ductilidad del cemento asfáltico 85-100.

Descripción	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Ductilidad	cm.	115	105	107

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo:

Se realizó un promedio de ambas muestras obteniendo como resultado 109 cm.

3.3. MATERIAL A RECICLAR

3.3.1. Pavimento reciclado

3.3.1.1. Extractor centrífugo

Este método contempla la extracción del asfalto de la mezcla y de núcleos de pavimento, con la ayuda de los solventes: tricloroetileno, bromuro de propilo normal, o cloruro de metileno, diésel, gasolina, etc.... El contenido de asfalto se determina por diferencia de las masas del agregado extraído; el contenido de humedad y, materia mineral. Comúnmente es usado para determinar cuantitativamente el contenido de asfalto en la mezcla o el pavimento para la determinación de especificaciones, para la evaluación; control e investigación. Para este ensayo se utilizó gasolina como fluidificante.

Imagen 3.3:1. Pavimento reciclado peso para depositar en el extractor centrífugo



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.3:2. Retiro del material del extractor centrífugo



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.3:3. Agregado extraído del pavimento reciclado



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

Tabla 3.3.1. Calculo del porcentaje de cemento asfáltico

Porcentaje de asfalto en el RAP		
Primera muestra de RAP		
Peso de muestra	1200,00	gr.
Peso de plato	126,60	gr.
Peso de muestra + plato	1264,40	
Peso de muestra sin cemento asfáltico	1137,80	gr.

1200,00	=	100 %
1137,80	=	x

$$X = 94,82 \%$$

Porcentaje de asfalto =	5,18 %
-------------------------	--------

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3.2. Resultado del 2º porcentaje de cemento asfáltico

Segunda muestra de RAP		
Peso de muestra	1200,00	gr.
Peso de plato	126,60	gr.
Peso de muestra + plato	1257,20	gr.
Peso de muestra sin cemento asfáltico	1131,10	gr.

1200,00		100 %
1131,10		x

$$X = 94,2583 \%$$

Porcentaje de asfalto 5,74 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3.3. Resultado del 3º porcentaje de cemento asfáltico

Tercer muestra de RAP		
Peso de muestra	1200,00	gr.
Peso de plato	126,60	gr.
Peso de muestra + plato	1264,40	gr.
Peso de muestra sin cemento asfáltico	1132,77	gr.

1200,00		100 %
1132,77		x

$$X = 94,3975 \%$$

Porcentaje de asfalto =	5,61 %
-------------------------	--------

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3.4. Resultado promedio de los tres ensayos de extracción centrífugo

	Porcentaje de asfalto %
	5,18
	5,74
	5,61
Promedio	5,51

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2. Granulometría del pavimento reciclado

Se procedió a realizar el tamizado del material obtenido del método centrífugo del RAP para hacer un análisis del tipo de granulometría que estaba compuesto el pavimento.

Imagen 3.3:4. Granulometría del agregado reciclado



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.3:5. Peso del tamiz más el agregado retenido



Fuente: Elaboración propia

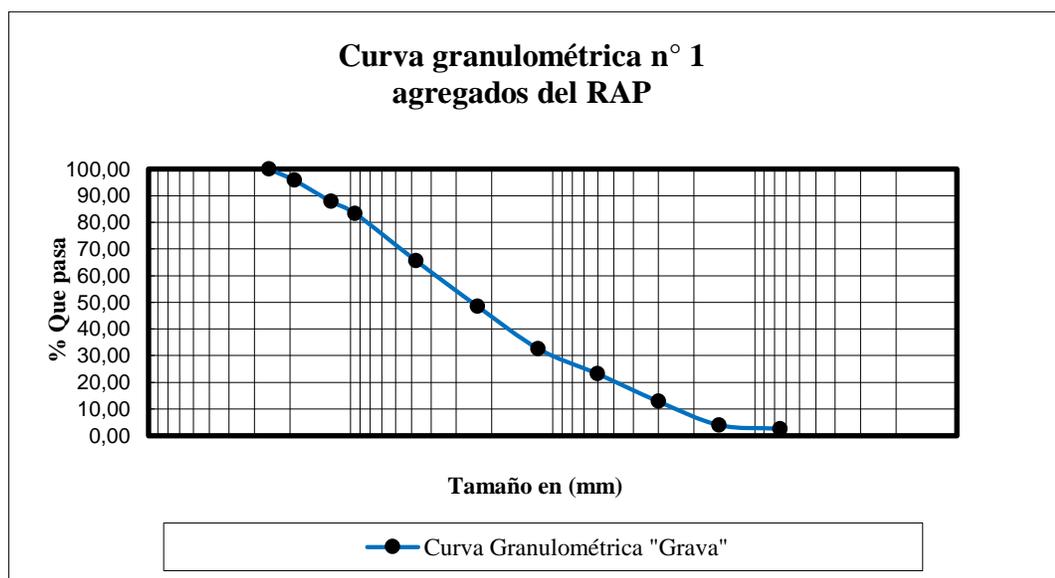
Granulometría n° 1

Tabla 3.3.5. Granulometría del RAP n° 1

Peso total (gr.)			1131,1		
N° de Tamices	Tamaño (mm)	Peso retenido.	Retenido Acum.	% Retenido	% que pasa del total
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	47,70	47,70	4,22	95,78
1/2"	12,50	89,90	137,60	12,17	87,83
3/8"	9,50	50,80	188,40	16,66	83,34
N°4	4,75	200,20	388,60	34,36	65,64
N°8	2,36	193,20	581,80	51,44	48,56
N°16	1,18	180,60	762,40	67,40	32,60
N°30	0,60	106,70	869,10	76,84	23,16
N°50	0,30	117,10	986,20	87,19	12,81
N°100	0,15	100,30	1086,50	96,06	3,94
N°200	0,075	15,40	1101,90	97,42	2,58
BASE	-	29,20	1131,10	100,00	0,00
Suma		1131,10			

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.3:1. Granulometría del RAP



Fuente: Elaboración propia

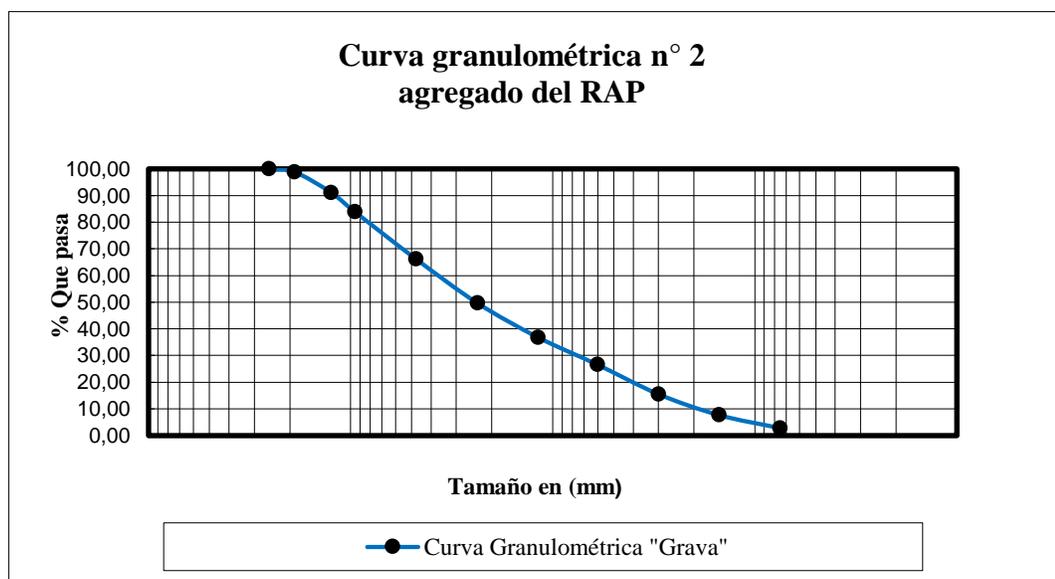
Granulometría n° 2

Tabla 3.3.6. Granulometría del RAP n° 2

Peso total (gr.)			1137,8		
N° de Tamices	Tamaño (mm)	Peso retenido.	Retenido acum.	% Retenido	% que pasa del total
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	12,60	12,60	1,11	98,89
1/2"	12,50	88,30	100,90	8,87	91,13
3/8"	9,50	83,30	184,20	16,19	83,81
N°4	4,75	200,50	384,70	33,81	66,19
N°8	2,36	188,10	572,80	50,34	49,66
N°16	1,18	146,90	719,70	63,25	36,75
N°30	0,60	116,40	836,10	73,48	26,52
N°50	0,30	125,60	961,70	84,52	15,48
N°100	0,15	89,70	1051,40	92,41	7,59
N°200	0,075	55,20	1106,60	97,26	2,74
BASE	-	31,20	1137,80	100,00	0,00
Suma		1137,80			

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.3:2. Granulometría del RAP n° 2



Fuente: Elaboración propia

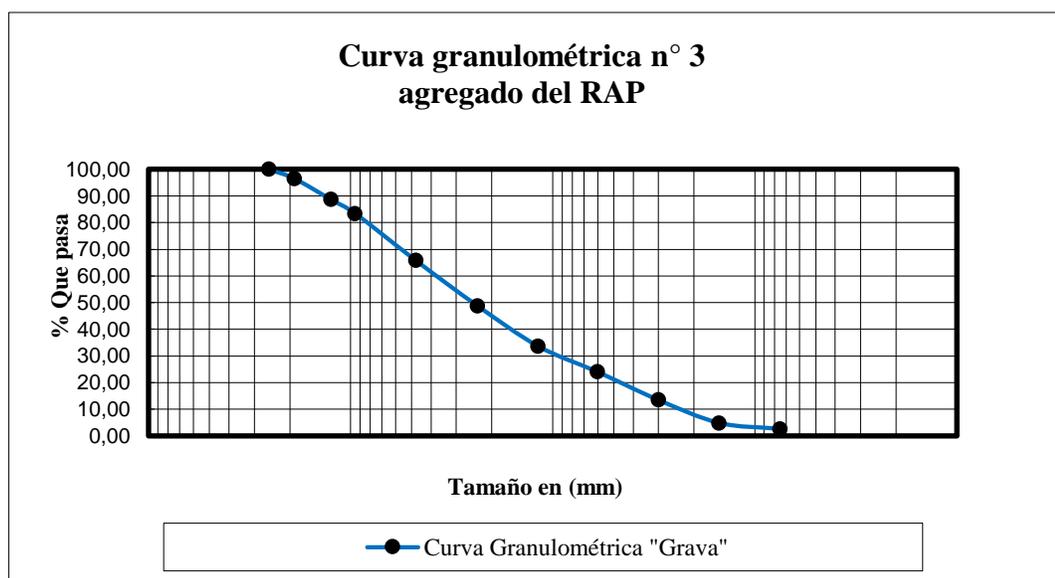
Granulometría n° 3

Tabla 3.3.7. Granulometría del RAP n° 3

Peso total (gr.)			1132,8		
N° de Tamices	Tamaño (mm)	Peso retenido.	Retenido acum.	% Retenido	% que pasa del total
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	38,92	38,92	3,44	96,56
1/2"	12,50	89,50	128,43	11,34	88,66
3/8"	9,50	58,93	187,35	16,54	83,46
N°4	4,75	200,28	387,63	34,22	65,78
N°8	2,36	191,93	579,55	51,16	48,84
N°16	1,18	172,18	751,73	66,36	33,64
N°30	0,60	109,13	860,85	75,99	24,01
N°50	0,30	119,23	980,08	86,52	13,48
N°100	0,15	97,65	1077,73	95,14	4,86
N°200	0,075	25,35	1103,08	97,38	2,62
BASE	-	29,70	1132,78	100,00	0,00
Suma		1132,80			

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.3.3. Granulometría del RAP n° 3



Fuente: Elaboración propia

3.3.1.3. Peso específico del agregado grueso del pavimento reciclado

Se realizó el ensayo tres veces para un peso de 1,5 kg de diferentes muestras, para todo lo que es agregado grueso.

Imagen 3.3:6 Agregado grueso del pavimento reciclado en remojo, para realizar peso superficialmente seco



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.3:7 Peso sumergido de agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3.8. Peso específico agregado grueso del RAP

Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
2,63	2,67	2,75	1,68
2,63	2,68	2,76	1,86
2,64	2,68	2,75	1,51
2,63	2,68	2,75	1,68

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.4. Peso específico del agregado fino (arena)

Para la obtención del peso específico del agregado fino se realizó tres ensayos del mismo material buscando en ambos la cantidad de humedad óptima del agregado fino.

Imagen 3.3:8 Remojo de material fino para hacer secado para humedad optima



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.3:9 Humedad óptima para vaciar al matraz



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3.9. Peso específico del agregado fino del RAP

Peso específico a granel (gr/cm³)	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm³)	Peso específico aparente (gr/cm³)	% de absorción
2,57	2,66	2,84	1,57
2,61	2,66	2,73	1,66
2,61	2,67	2,79	1,43
2,60	2,67	2,79	1,56

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.5. Peso específico del aceite quemado de motor

Se realizó el mismo procedimiento que se realiza para el peso específico del cemento asfáltico. El peso específico es sacado con la finalidad de meter dentro los cálculos del Marshall.

El aceite quemado de motor se extrajo de una maquina pala cargadora CAT 950 la cual el aceite que utiliza es de la marca móvil. El aceite usado por esta máquina de motor a diésel es un 15w-40.

Descripción de producto

Mobil Delvac MX™ 15W-40 es un aceite de muy alto rendimiento para motores diésel que proporciona una excelente lubricación a los motores diésel modernos que promueve una mayor vida útil del motor. Como resultado, este producto cumple o excede con la mayoría de las especificaciones de los fabricantes de motores americanos y europeos. Su elevado rendimiento ha sido probado en un amplio rango de industrias, aplicaciones y flotas mixtas.

Su avanzada formulación química ofrece un insuperable rendimiento en motores modernos diésel de bajas emisiones, así como en motores más antiguos que operan con combustible de bajo o alto contenido de azufre. Mobil Delvac MX 15W-40 combina una mezcla de aceites base de alta calidad con un progresivo sistema de aditivos, que le

proporcionan un control superior del espesamiento del aceite debido a la formación de hollín y a las elevadas temperaturas así como una insuperable resistencia a la oxidación, corrosión y depósitos a altas temperaturas.

En este caso se sabe que, al cumplir el aceite una función de lubricación dentro el motor pierde muchas de sus propiedades, pero es un aceite que sirve para reciclar de tal manera fue considerado para este diseño.

Imagen 3.3:10. Materiales a utilizar para la práctica



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.3:11. Peso de muestras



Fuente: Elaboración propia

Imagen 3.3:12. Muestras con agua y aceite quemado de motor



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica del peso específico del aceite quemado de motor

Tabla 3.3.10. Resultado del peso específico del aceite

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Peso picnómetro	gr	35,1	33,9	36,9	
Peso picnómetro + agua (25 °C)	gr	85,15	84,2	87,2	
Peso picnómetro + muestra	gr	70,2	60,1	63,6	
Peso picnómetro + gua + Muestra	gr	80,2	80,6	83,2	
Peso específico promedio	gr/cm ³	0,874	0,877	0,868	0,873

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.6. Ensayo punto de inflamación (AASTHO T-48) (ASTM D-92)

Mediante esta práctica de punto de inflamación se usó para ver a que temperatura el aceite quemado de motor es la temperatura más baja a la cual se separa materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación del betún asfáltico indica la temperatura a que puede calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre. Esta temperatura es usualmente muy inferior a aquella a que el material ardería. Esta última temperatura se llama punto de fuego, pero rara vez se incluye en las especificaciones de los betunes asfálticos. Los

aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de punto de inflamación se describen en el Método AASTHO T-18 y en el ASTM D-92.

Imagen 3.3:13 Calentamiento para el punto de inflamación



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica

Ensayo	Unidad	Ensayo 1
Punto de Inflamación AASTHO T-48	°C	>218
Numero de ensayos		3

Calculo:

Realizando el cálculo de la media de los ensayos realizados.

Resultados: 219 °C.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

4.1. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL MÉTODO DEL MARSHALL

4.1.1. Método de diseño Marshall convencional AASHTO T 245

Objetivo de la práctica

Este procedimiento es aplicable a mezclas en caliente con cementos asfálticos que contengan áridos con tamaño máximo absoluto o inferior a 25 mm (1 pulg.). Se puede usar tanto para el diseño en laboratorio como en el control de terreno.

Resumen del metodo

El procedimiento consiste en la elaboración de briquetas (probetas cilíndricas de 101,6 mm. de diámetro y 63,5 mm de altura, rompiéndolas posteriormente en la prensa Marshall determinando su estabilidad y flujo.

Si se desea determinar el porcentaje de vacios de las mezclas, se determinaran previamente los pesos específicos de los materiales empleados y de las briquetas compactadas antes del ensayo de rotura.

Previa a la preparación de las briquetas es necesario determinar la granulometría de los áridos y la combinación de estos, además de los pesos específicos de los mismos,asi como también del asfalto

Equipo y materiales

Moldes de compactación, se conforman de una placa de base plana con su molde y collar de extensión cilíndricos. El molde deberá tener un diámetro interior de 4” y una altura aproximada de 3”, la placa de base y el collarín deberán ser intercambiables o sea que se deberán ajustar en los dos extremos de los moldes

Extractor, que sirva para sacar las briquetas del molde.

Martillo de compactación, consiste en una cara circular de 100 mm. De diámetro equipada con un peso de $4,515 \pm 15$ gr (10 lb) Y construido de modo de obtener una altura de caída de 460 ± 2 mm.

Pedestal de compactación, consiste en un poste de madera de 205 x 205 x 455 mm. Cubierto con una placa de acero de 305 x 305 x 25 mm. Debe estar empotrado y quedar firmemente afianzada y a nivel.

Sujetador de molde, consiste en un aro con resorte diseñado para mantener centrado y fijo el molde en el pedestal durante la compactación.

Mordaza, son dos segmentos de cilindro (superior e inferior) con un radio interno de 51 ± 0.2 mm. Diseñado para transmitir la carga.

Maquina Marshall, aparato eléctrico diseñado para aplicar carga a las probetas durante el ensayo a una velocidad de deformación de 50 ± 1 mm/min. Está equipada con un anillo de prueba calibrada para determinar la carga aplicada de una capacidad superior a 25 kN y una sensibilidad de 45 N. con un dial graduado de 0.0025 mm. Y un medidor de flujo con una precisión de 0.01 mm. Para determinar la deformación que se produce en la carga máxima.

Horno, capaz de mantener la temperatura requerida con un error menor de 3 °C (5 °F) se emplea para calentar los agregados, material asfáltico, conjunto de compactación y muestra.

Baño de agua, deberá ser controlado termostáticamente a 60 ± 1 °C y también contara con un fondo falso y un termómetro centrado y fijo.

Realizar la combinación de agregados de gravedad específica y absorción en relación al porcentaje que se obtiene la estructura granular de las granulometrías propuestas, el diseño de mezcla debe proporcionar la granulometría que se encuentra dentro de los rangos de diseño.

Recipientes, de dos litros de capacidad para calentar los agregados y para mezclar el asfalto y agregado.

Tamices, de 50 mm (2"); 37,5 mm (1 1/2"); 25 mm (1"); 19,0 mm (3/4"); 12,5 mm (1/2"); 9,5 mm (3/8"); 4,75 mm (N° 4); 2,36 mm (N° 8); 300 µm (N° 50) y 75 µm (N° 200).

Termómetros blindados, de 10 °C a 232 °C (50 °F a 450 °F) para determinar las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de 3 °C. Para la temperatura del baño de agua se utilizará termómetro con escala de 20 °C a 70 °C y sensibilidad de 0,2 °C (68 °F a 158 °F + 0,4 °F).

Balanza, para pesar agregado y asfalto de 5 kg. De capacidad, y sensibilidad de un 1 gr.

Para pesar probetas compactadas de 2 kg. De capacidad y sensibilidad de 0,1 gr.

Pírex de 500 cm³.

Guantes de cuero, para poder manipular el equipo caliente.

Bandejas taradas.

Espátulas.

4.1.2. Preparación de los especímenes Marshall

Dosificación de agregados para una briqueta

El procedimiento para dosificación de agregado que se utiliza en el método de diseño que se explica en este documento es el que recomienda la norma Bolivia de Laboratorio de suelos y asfalto, que los agregados se separen por tamizado seco en ciertas fracciones y recomienda los rangos.

Según el tamaño máximo de los agregados (3/4") que se utilizan en el diseño, se toman las siguientes fracciones de tamaño:

25,40 mm a 19,05 mm (1 pulg a 3/4 pulg)

19,05 mm a 12,70 mm (3/4 a 1/2 pulg)

12,70 mm a 9,53 mm (1/2 a 3/8 pulg)

9,53 mm a 4,75 mm (3/8 pulg a N° 4)

4,75 mm a 3,56 mm (N° 4 a N° 10)

3,56 mm a 2,00 mm (N° 10 a N° 16)

2,00 mm a 1,00 mm (N° 16 a N° 40)

1,00 mm a 0,42 mm (N° 40 a N° 50)

0,42 mm a 0,18 mm (N° 50 a N° 80)

0,18 mm a 0,075 mm (N° 80 a N° 200)

Pasa por malla N° 200

Nuestro diseño utiliza tres tamaños de agregado con sus respectivos porcentajes establecidos que son: agregado grueso 3/4", agregado medio 3/8" y arena que pasa el tamiz N° 4, en este caso para poder hacer una briqueta de 1200 gr se tienen cuatro

fracciones de agregado, lo cual implica que se deben pesar cuatro cantidades, una de cada fracción para complementar una dosificación de agregado para una elaboración de una briqueta; para éstas fracciones no tenemos todavía un porcentaje establecido por lo que se procede a calcularlo de las granulometrías propuestas que se obtuvo al combinar los tres agregados.

El porcentaje retenido se calcula es restando los porcentajes acumulados que pasan entre las mallas en las que se encuentra dicha fracción.

Preparación de la mezcla

Pese en bandejas separadas para cada briqueta la cantidad necesaria de cada fracción para producir muestra quede como resultado una briqueta compacta de altura igual a 65 mm más o menos. Normalmente se requieren 1200 gr.

Coloque las bandejas en el horno y caliente a una temperatura de aproximadamente 30 °C sobre la temperatura de mezclado.

Coloque el árido caliente en una bandeja y revuelva completamente, forme un cráter en el árido y pese la cantidad necesaria de cemento asfáltico e incorpórela en la bandeja junto con los áridos. Asegúrese que la temperatura en ese instante sea la de mezclado.

Mezcle el asfalto y el árido tan rápido como sea posible hasta que de completamente uniforme.

Compactación de briquetas

Prepare el molde y el martillo, limpiándolos completamente y calentándoles durante 15 min. A una temperatura próxima a la de compactación, coloque un disco de papel filtro (papel común pintado con aceite sucio) cortado a medida, suavice las paredes del molde con aceite. Coloque el conjunto collar molde y base en el pedestal del compactador. Coloque la mezcla para la elaboración de briqueta.

Llene el molde con la espátula acomodando la mezcla 15 veces en el perímetro y 10 veces en el centro.

Con el martillo de compactación aplique 75 golpes en un tiempo no superior a 90 s. Saque la base y el collar, invierta y re ensamble el molde y aplique en la otra cara del molde el mismo número de golpes.

Después de compactar saque la base y deje enfriar la briqueta al aire. Si se desea puede utilizar un ventilador. Normalmente se deja enfriar toda la noche.

Gravedad específica Bulk mezcla compactada (Gmb)

Después de la compactación de las briquetas y su posterior extracción de los moldes para su respectivo curado a temperatura ambiente, se procede a realizar el ensayo de la gravedad bulk, según AASHTO T 166-05. El procedimiento seguido fue secar los especímenes hasta masa constante (curado a temperatura ambiente). Luego se registró el peso seco de cada briqueta. Luego se sumergieron en un recipiente con agua a 25 °C, dejándolos saturar por lo menos 10 minutos. Al final del período de 10 minutos se removieron los especímenes y se colocaron en la canastilla sumergida previamente agitada para la eliminación de burbujas de aire, y se registró el peso sumergido de cada briqueta, inmediatamente al retirar la briqueta de la canastilla se secó la humedad del espécimen con una toalla húmeda tan rápido como fue posible. Pesamos al espécimen y registramos como peso saturado superficialmente seco.

La norma AASHTO T 166-05 establece que la diferencia máxima permitida entre dos valores de gravedad específica bulk es de 0,02, para que puedan ser promediados, aquella gravedad bulk que sobrepasa dicho valor es descartada.

Calculo:

$$Gmb = \frac{W_{seco\ al\ aire}}{W_{s.s.s.} - W_{sumergido}} = \frac{B}{C - D}$$

4.1.3. Cálculo de las propiedades volumétricas

Porcentaje de vacíos en total de la mezcla (VTM)

Los vacíos de aire o vacíos en total de mezcla se pueden definir como el volumen total de una pequeña bolsa de aire entre las partículas cubiertas del agregado en una mezcla de pavimento compactada, expresado como el porcentaje del volumen neto de la mezcla de pavimento compactado.

En mezclas asfálticas densas, este valor de vacíos según las especificaciones, debe estar en el rango de 3 a 5 %. Existe una relación entre la gravedad específica Bulk y la teórica

máxima, esta última no contempla vacíos en su muestra, mientras que una briqueta compactada si posee vacíos en su interior, por lo tanto si el procedimiento se ha efectuado correctamente, la gravedad específica Bulk siempre es menor que la gravedad específica teórica máxima.

La fórmula para calcular el porcentaje de vacíos es la siguiente: $100 \cdot (j-f)/j$

$$\% VTM = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} = \frac{J - F}{J}$$

VTM = Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

Gmm = Densidad máxima teórica de la mezcla de pavimentación.

Gmb = Densidad promedio de la mezcla compactada.

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM)

Se definen como el vacío intergranular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total.

La ecuación utilizada para determinar los vacíos en el agregado mineral (VAM) es la siguiente:

$$\% V.A.M. = \%VTM \left(\frac{Gmb * \%C.A.}{Ga.C.A.} \right)$$

Dónde:

VMA = Vacíos en el agregado mineral (porcentaje del total de la mezcla)

Gmb = Densidad de la mezcla compactada.

C.A. = Porcentaje de cemento asfáltico.

R.B.V. (Vacíos llenos con asfalto)

Los vacíos llenos de asfalto, son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA), que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire,

mientras que el R.B.V. solamente abarca el asfalto que une a los agregados (asfalto efectivo), el valor de R.B.V. se expresa generalmente como un porcentaje.

La ecuación que determina el R.B.V. Es la siguiente:

$$\% \text{ R. B. V.} = 100 * \frac{VMA - VTM}{VMA}$$

Dónde:

R.B.V. = Vacíos llenos con asfalto, porcentaje de VMA.

V.M.A. = Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del total de la mezcla.

V.T.M. = Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

Medición de la estabilidad y la fluencia

Para briquetas confeccionadas con cemento asfáltico coloque estas en un baño de agua a 60 ± 1 °C durante 30 a 40 min antes de ensayar.

Limpie completamente la mordaza, la temperatura de esta debe mantenerse entre 21 °C y 38 °C usando un baño de agua si es necesario lubrique las barras guías con una película delgada de aceite de modo que la parte superior de la mordaza se deslice nuevamente. Si se usa un anillo de prueba para medir la carga aplicada asegúrese que el dial este firmemente ajustado y en cero.

Saque la probeta del agua y seque cuidadosamente la superficie coloque y centre la probeta en la parte inferior de la mordaza luego coloque la parte superior y centre el conjunto en el aparato de carga.

Aplique carga a la briketa a una velocidad constante de deformación de 50 ± 1 mm/min. Hasta que produzca la falla.

El punto de falla queda definido por la carga máxima obtenida el cual se define como la estabilidad Marshall como el número total de Newtons o libras necesarios para producir falla de la briketa a 60 °C. A medida que avanza el ensayo de estabilidad sujete firmemente el medidor de flujo sobre la barra guía, cuando se produzca la carga máxima, tome la lectura y anótela. Esta lectura es el valor de la fluidez de la briketa expresada en unidades de 0,25 mm (1/100 pulg.)

El procedimiento completo de estabilidad y fluencia comienza desde el momento en que se retira la briqueta del agua y no debe durar más de 30 s.

4.2. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL EN CALIENTE

En este caso se realizó todo el análisis de la granulometría del material nuevo de aportación para realizar la mezcla convencional y poder saber el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para esta mezcla nueva o virgen. En este diseño se tomó como granulometría la media de las granulometrías anteriores para poder definir los porcentajes necesarios para la mezcla.

4.2.1. Granulometría combinada

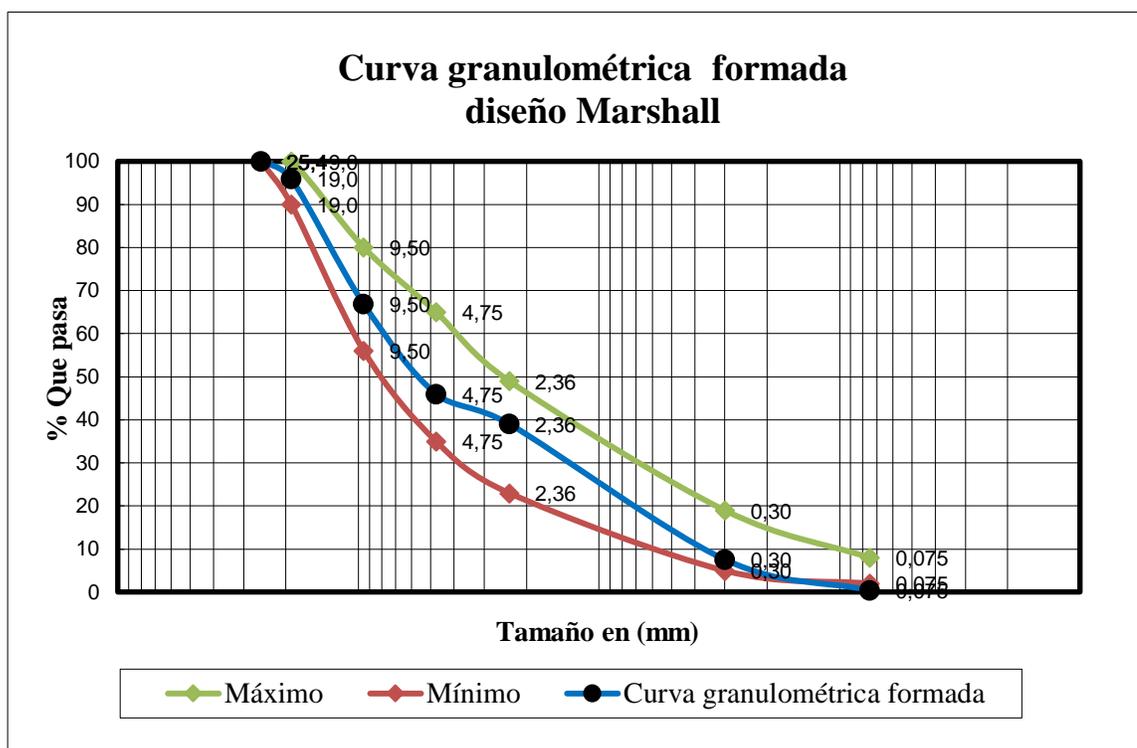
Los porcentajes usados para esta granulometría fue de grava de 3/4" 30 %, gravilla 3/8" 25 % y arena que pasa el tamiz número cuatro 45 %. Para la formación de una briqueta de 1200 gr.

Tabla 4.2.1. Combinación de la granulometría del material de aportación

N° Tamices	Tamaño (mm)	Total				Especificaciones	
		Peso retenido.	Retenido acumulado	% Retenido	% que pasa del total	Mínimo	Máximo
		1,00					
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,00	123,26	123,26	4,11	95,89	90	100
1/2"	12,50	601,93	725,19	24,18	75,82	-	-
3/8"	9,50	268,90	994,09	33,14	66,86	56	80
N°4	4,75	626,29	1620,38	54,02	45,98	35	65
N°8	2,36	207,96	1828,34	60,96	39,04	23	49
N°16	1,18	213,06	2041,40	68,06	31,94	-	-
N°30	0,60	336,07	2377,47	79,27	20,73	-	-
N°50	0,30	394,48	2771,95	92,42	7,58	5	19
N°100	0,15	175,15	2947,10	98,26	1,74	-	-
N°200	0,075	38,65	2985,75	99,55	0,45	2	8
BASE	-	13,62	2999,37	100,00	0,00	-	-
	Suma	2999,4					

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.2:1. Curva granulométrica del diseño convencional



Fuente: Elaboración propia

Con la granulometría formada se procedió con el ensayo de las briquetas las cuales se compactaron a temperaturas de entre 140 °C a 160 °C, con 75 golpes para un tráfico pesado y así poder realizar seguidamente el ensayo Marshall.

Imagen 4.2:1. Calentamiento de moldes y agregados en el horno



Fuente: Elaboración propia

Imagen 4.2:2. Calentamiento de agregados en el horno



Fuente: Elaboración propia

Imagen 4.2:3. Mezcla de los materiales a más de 140 °C y compactación con el martillo Marshall a 75 golpes



Fuente: Elaboración propia

Imagen 4.2:4. Compactación con martillo Marshall



Fuente: Elaboración propia

Imagen 4.2:5. Briquetas elaboradas para realizar el baño maría a 60 °C para luego colocar en el anillo Marshall



Fuente: Elaboración propia

Imagen 4.2:6. Colocado de briqueta en el Marshall para lectura de la estabilidad y fluencia.



Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Proceso de cálculo de Propiedades Mecánicas de la Mezcla asfáltica

Se desarrollará el proceso de cálculo para una briqueta en el cual se indicará paso a paso como se obtuvo los resultados que posteriormente se muestra en una tabla.

La demostración de cálculo se realizará con las briquetas elaboradas con el 4 % de cemento asfáltico.

Identificaciones de briquetas

Para la identificación de las briquetas se las enumeró en el caso del porcentaje en estudio 4 % se identificó como 1, 2 y 3.

Altura de las briquetas

Después de haber procedido a la compactación con el martillo se extrae de los moldes y se deja enfriar para posteriormente realizar las mediciones de la altura con el vernier, obteniendo cuatro alturas de cada briqueta.

Para el porcentaje de asfalto de 4 % sus alturas correspondientes son las siguientes:

identificación	Altura (cm)	Promedio de altura (cm)
1	6.79	6.77
	6.76	
	6.75	
	6.77	
2	6.72	6.71
	6.68	
	6.71	
	6.71	
3	6.75	6.74
	6.84	
	6.74	
	6.62	

Porcentaje de asfalto

Base de la mezcla: Se toma el valor del porcentaje de asfalto para elaborar las 3 briquetas.

$$\text{Base del agregado} = \frac{\text{Base de la mezcla} * 100}{100 - \text{Base de la mezcla}}$$

$$\text{Base del agregado} = \frac{4 * 100}{100 - 4}$$

$$\text{Base del agregado} = 4.17$$

Peso de la briqueta al aire

El peso en el aire se obtiene pesando directamente las briquetas en una balanza.

Identificación	Peso (gr)
1	1198.0
2	1196.3
3	1190.6

Peso de la briqueta en el aire saturada superficialmente seco (SSS)

El peso de la briqueta SSS se lo mide saturando la briqueta en el agua durante 30 min a 25°C y secándola superficialmente.

Identificación	Peso (gr)
1	1200.0
2	1198.9
3	1193.1

Peso de la briqueta sumergida en agua

El peso sumergido se lo mide cuando se sumerge la briqueta en el agua a 25°C.

Identificación	Peso (gr)
1	690
2	691
3	687

Volumen de la briqueta

$$\text{Vol. briqueta} = \text{Peso S. S. S.} - \text{Peso sumergido}$$

$$\text{Vol. briqueta} = 1200 - 690,00$$

$$\text{Vol. briqueta} = 510,00 \text{ cm}^3$$

Cálculo realizado para la briqueta identificada como “1”.

Densidad de la briqueta

Densidad real

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{Peso briqueta en aire}}{\text{Volumen de briqueta}}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{1198,00}{510,0}$$

$$\text{Densidad real} = 2,35 \text{ kg/cm}^3$$

Densidad máxima teórica de la briqueta

$$D_{\text{maxT}} = \frac{100}{\left(\frac{\% \text{asfalto}}{\text{Peso esp asf}}\right) + \left(\frac{100 - \% \text{asf}}{\text{Peso esp agr grueso}}\right)}$$

$$D_{\text{maxT}} = \frac{100}{\left(\frac{4}{1,0103}\right) + \left(\frac{100 - 4}{2,77}\right)}$$

$$D_{\text{maxT}} = 2,586 \text{ kg/cm}^3$$

Porcentaje de vacíos

Porcentaje de vacíos de la mezcla (Vv)

$$V_v = \left(\frac{D_{\text{maxT}} - \text{Dens prom}}{D_{\text{maxT}}}\right) * 100$$

$$V_v = \left(\frac{2,586 - 2,352}{2,586}\right) * 100$$

$$V_v = 9,04\%$$

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (V.A.M.)

$$VAM = \left(\frac{\% \text{ de asf} * \text{Dens prom}}{\text{Peso esp del asf}} \right) + V_v$$

$$VAM = \left(\frac{4 * 2,352}{1,0103} \right) + 10,01\%$$

$$VAM = 18,35 \%$$

Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (R.B.V.)

$$RBV = \left(\frac{VAM - V_v}{VAM} \right) * 100$$

$$RBV = \left(\frac{18,35 - 9,04}{18,35} \right) * 100$$

$$RBV = 50,74 \%$$

Estabilidad y fluencia

Identificación	Lectura dial	
	Estabilidad	fluencia
1	754,00	140,00
2	669,00	130,00
3	694,00	160,00

Se debe realizar la corrección con la fórmula de calibración de la prensa Marshall.

Estabilidad

$$\text{Estabilidad Real} = (\text{Lectura dial} * 0,012 - 0,0812) * 102 * 2,2$$

$$\text{Estabilidad Real} = (754 * 0,012 - 0,0812) * 102 * 2,2$$

$$\text{Estabilidad Real} = 2012,15 \text{ Lb}$$

Resumen de las tres briquetas calculadas.

Identificación	Estabilidad (dial)	Estabilidad real (lb)
1	754,00	2012,15
2	699,00	1783,26
3	694,00	1850,58
Promedio		1881,99

Corrección por altura

El factor de corrección por la altura para las briquetas se lo realiza con la tabla que se encuentra en anexos.

Identificación	Factor de corrección
1	0,91
2	0,90
3	0,884
Promedio	0,898

Estabilidad corregida = Estabilidad real prom * Factor de corrección

Estabilidad corregida = 1881,99 * 0,898

Estabilidad corregida = 1690,88 Lb

Fluencia

Fluencia 1/100 = (Lectura dial)/(25,4)

Fluencia 1/100 = (140)/(25,4)

Fluencia 1/100 = 5,51

Identificación	Factor de corrección
1	5,51
2	5,12
3	6,17
Promedio	5,64

Nota: de igual manera se realizan los cálculos para los demás datos, a continuación, se presenta una planilla general de resultados.

4.2.3. Mezcla asfáltica convencional

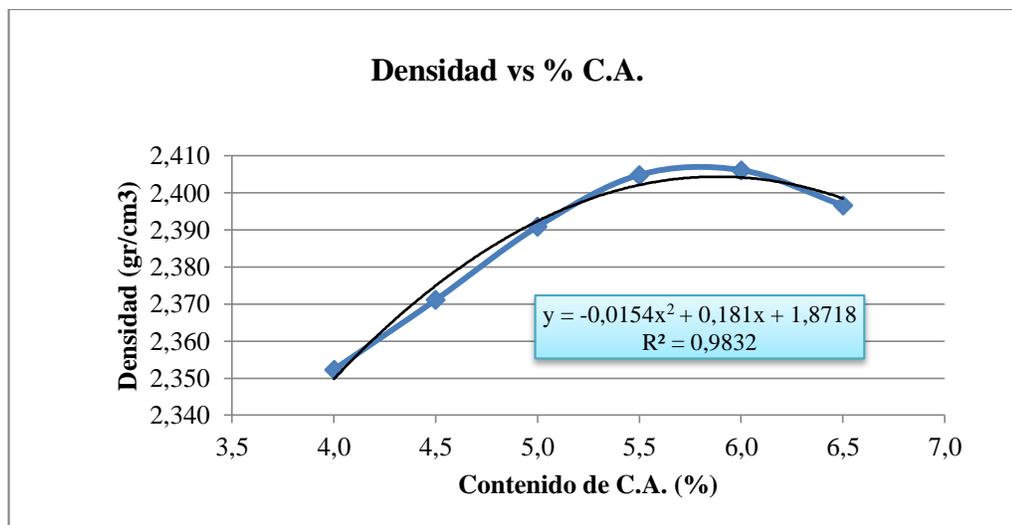
Tabla 4.2.2. Planilla Marshall de mezcla asfáltica convencional

Pesos específicos			% de agregado		Numero de golpes 75			Agregado			P.E.		%									
Mat. Retenido tamiz N° 4	2,72	55	Cemento asfáltico BETUNEL 85-100			Grava			2,72	30	Gravilla			2,71	25							
Mat. Pasa tamiz N° 4	2,83	45	Peso específico del ligante AASHTO T-228			1,0103			Arena			2,83	45									
Peso específico total	2,77	100																				
N° de probeta	Altura de probeta	% de Asfalto		Peso briqueta			Volumen	Densidad briqueta			% de vacíos			Estabilidad Marshall				Fluencia				
		Base mezcla	Base agregados	Seco	sat. Sup. Seca	Sumergida en agua	Probeta	Pensidad real	Densidad promedio	Densidad máxima teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado mineral)	R.B.V. (relación betumen vacíos)	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	Lectura dial del flujo	Fluencia real	Fluencia promedio	
		%	%	grs.	Grs.	Grs.	Cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	-	0,01 pulg	
1	6,75	4,00	4,17	1198,0	1200,0	690	510,0	2,349	2,352	2,59	9,04	18,35	50,74	754	2012,1	0,910	1831,06	1691	140	0,055	5,643	
2	6,79			1196,3	1198,9	691	507,9	2,355						669	1783,3	0,900	1604,94		130	0,051		
3	6,86			1190,6	1193,1	687	506,1	2,352						694	1850,6	0,884	1636,65		160	0,063		
4	6,77	4,50	4,71	1194,4	1195,4	692	503,4	2,373	2,371	2,57	7,57	18,13	58,26	891	2381,1	0,905	2154,86	2159	170	0,0669	6,56	
5	6,71			1190,4	1192,2	690	502,2	2,371						915	2445,7	0,920	2250,04		170	0,0669		
6	6,74			1191,0	1193,5	691	502,5	2,370						850	2270,7	0,913	2071,98		160	0,0630		
7	6,33	5,00	5,26	1185,7	1188,3	691	497,3	2,385	2,391	2,54	6,05	17,88	66,18	1024	2739,2	1,005	2752,9	2669	190	0,0748	7,22	
8	6,71			1195,3	1197,6	699	498,6	2,397						1032	2760,7	0,920	2539,89		180	0,0709		
9	6,71			1191,0	1193,1	695	498,1	2,391						1102	2949,2	0,920	2713,3		180	0,0709		
10	6,66	5,50	5,82	1169,4	1170,5	684	486,5	2,404	2,405	2,52	4,74	17,83	73,41	1211	3242,8	0,932	3021,93	3039	190	0,0748	8,14	
11	6,50			1172,4	1173,5	687	486,5	2,410						1179	3156,6	0,963	3038,22		210	0,0827		
12	6,65			1195,4	1196,8	699	497,8	2,401						1223	3275,1	0,934	3058,26		220	0,0866		
13	6,66	6,00	6,38	1193,6	1194,4	698	496,4	2,405	2,406	2,50	3,93	18,22	78,41	1055	2822,7	0,932	2630,46	2782	280	0,1102	10,50	
14	6,56			1182,2	1183,7	693	490,7	2,409						1104	2954,6	0,951	2808,97		250	0,0984		
15	6,61			1194,8	1196,0	699	497,0	2,404						1153	3086,6	0,941	2905,4		270	0,1063		
16	6,59	6,50	6,95	1173,9	1175,0	684	491,0	2,391	2,397	2,49	3,56	18,98	81,24	865	2311,1	0,945	2183,94	2347	290	0,1142	12,20	
17	6,52			1199,3	1200,6	701	499,6	2,401						1023	2736,5	0,958	2621,85		330	0,1299		
18	6,76			1190,3	1191,3	695	496,3	2,398						921	2461,8	0,908	2234,13		310	0,1220		
Especificaciones				mínimo								3	13	65					1800			8
				máximo								5	-	75					-			16

Fuente: Elaboración propia

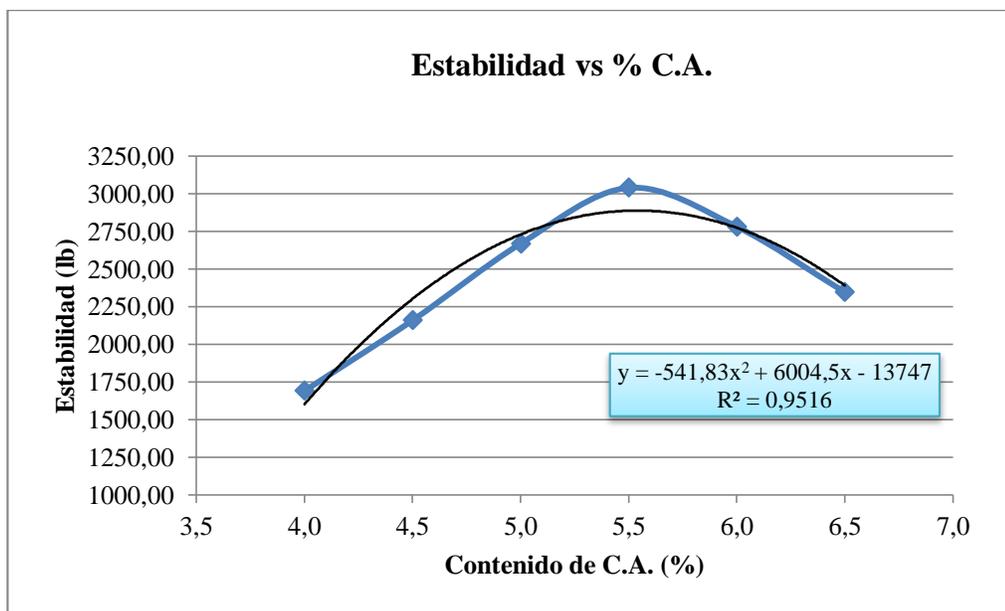
4.2.3.1. Gráficas de las resistencias técnicas del método Marshall

Gráfica 4.2:2. Densidad vs Cemento asfáltico



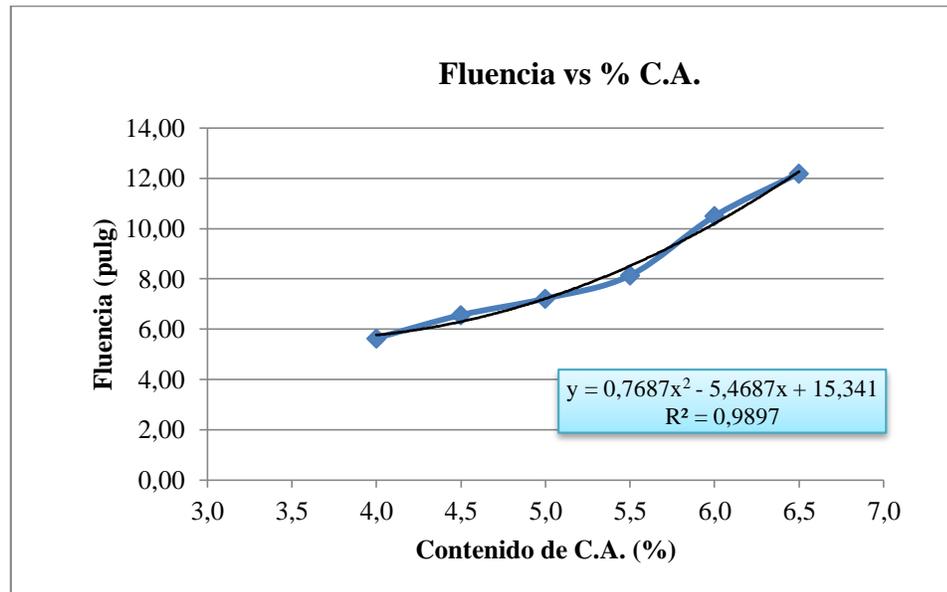
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.2:3. Estabilidad vs Cemento asfáltico



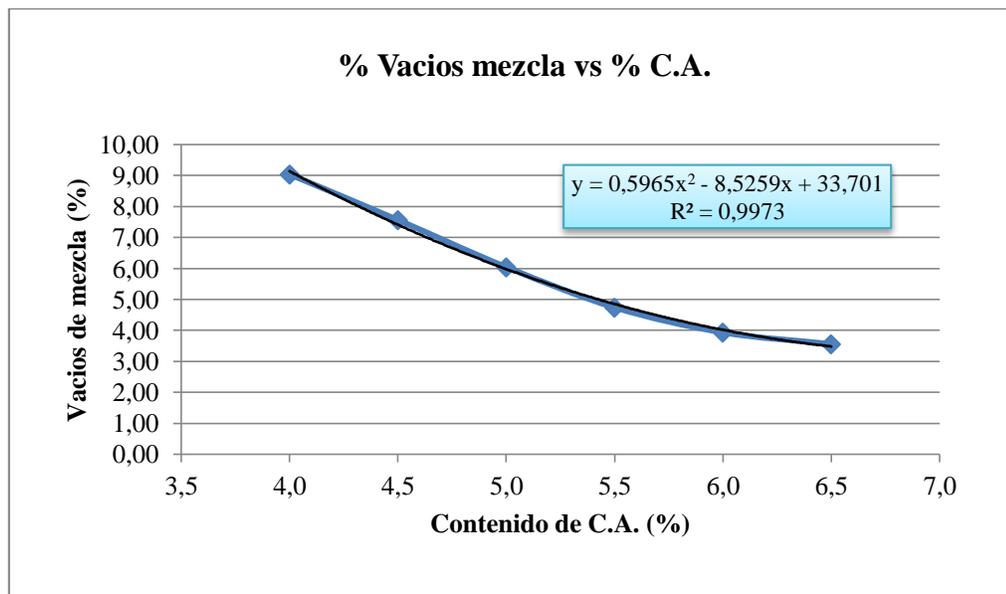
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.2:4. Fluencia vs Cemento asfáltico



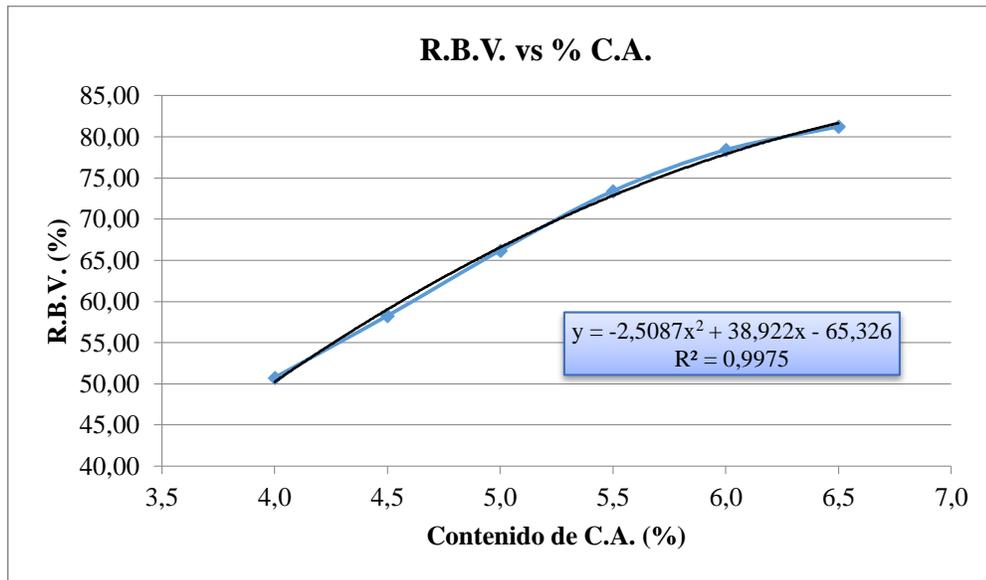
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.2:5. Vacíos vs Cemento asfáltico



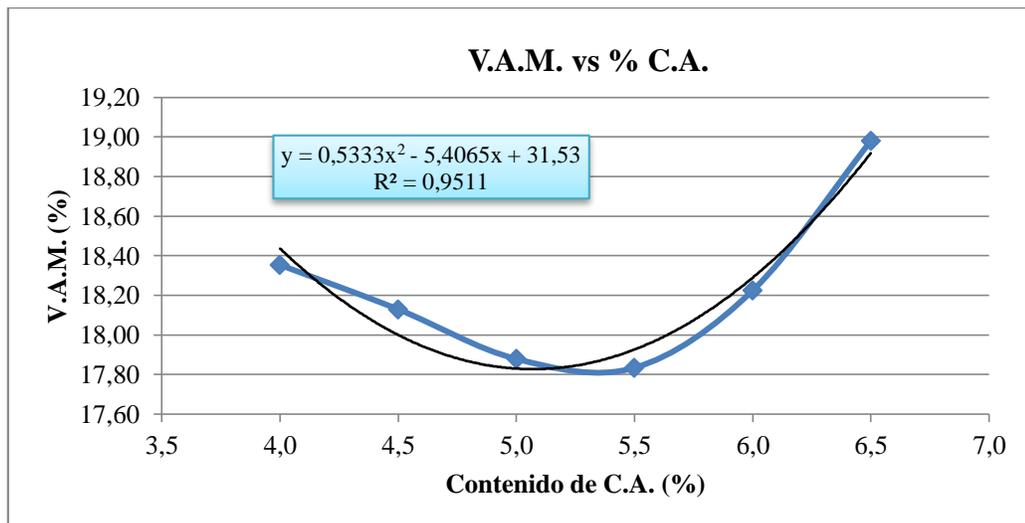
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.2:6. R.B.V. vs Cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.2:7. V.A.M. vs Cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

4.2.3.2. Resultados del diseño convencional de la mezcla con agregados nuevos

Los resultados siguientes se determinan de los valores de la densidad, estabilidad, flujo, % de vacíos, relación betún – vacíos, y vacíos de agregado mineral. Que para su obtención de sus valores entramos a las ecuaciones de las curvas que tiene cada gráfico, donde remplazando los valores de los especificados en la norma obtenemos un porcentaje para cada resistencia, el cual es el valor promedio.

Contenido de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% De vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4,0	2,352	1690,88	5,64	9,04	50,74	18,35
4,5	2,371	2158,96	6,56	7,57	58,26	18,13
5,0	2,391	2668,70	7,22	6,05	66,18	17,88
5,5	2,405	3039,47	8,14	4,74	73,41	17,83
6,0	2,406	2781,61	10,50	3,93	78,41	18,22
6,5	2,397	2346,64	12,20	3,56	81,24	18,98
X	5,877	5,541	6,200	6,010	5,261	5,069
Y máx.	2,404	2888,301	11,000	4,000	70,000	17,827

El promedio óptimo de cemento asfáltico tomando en cuenta las seis resistencias técnicas es = 5,66 %

Tabla 4.2.3 Resultados óptimos según el porcentaje óptimo de la mezcla convencional

Valores óptimos de la mezcla convencional				
Resistencia técnica	% óptimo de asfalto	Valores con él % optimo	Especificaciones técnicas	
Densidad promedio (gr/cm ³)	5,66	2,40	-----	-----
Estabilidad (libra)	5,66	2880,62	> 1800 lb.	
Fluencia (pulg)	5,66	9,01	8	14
% de vacíos de mezcla total (%)	5,66	4,55	3	5
R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	5,66	74,60	65	75
V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	5,66	18,01	> 13	

Fuente: Elaboración propia

4.3. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL MÁS EL PAVIMENTO RECICLADO EN CALIENTE

En este caso se realizó todo el análisis de la granulometría del material nuevo de aportación para realizar la mezcla convencional y la granulometría del pavimento reciclado y poder ver el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para esta mezcla con RAP. En este diseño se tomó como granulometría la media de las granulometrías anteriores sacadas del pavimento reciclado y los agregados nuevos de aportación para poder definir los porcentajes necesarios para la mezcla.

Tomando en cuenta la norma Colombiana de INVIAS en su ARTICULO 462-13 (Reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente), donde se define un contenido máximo de 40 % de RAP con un 60 % de agregados vírgenes y cemento asfáltico nuevo, así mismo se realizó el diseño. Considerando de igual forma la cantidad de asfalto que ya contiene el RAP, se empezó utilizando porcentajes 4,5 %; 5 %; 5,5 %; 6 % y 6,5 % de cemento asfáltico nuevo, solo para el peso 60% de agregados nuevos, que serán luego mezclados con el pavimento reciclado.

Los porcentajes usados para esta granulometría fue de grava de 3/4" 30 %, gravilla 3/8" 25 % y arena 45 %, estos porcentajes fueron multiplicados para un 60 % que es solo mezcla nueva. Y los 40 % restantes fue el pavimento reciclado que fue previamente triturado en pequeñas fracciones menores a una pulgada para la formación de una briqueta de 1200 gr.

4.3.1. Granulometría de la mezcla utilizando material de aporte y el pavimento reciclado

La granulometría formada en la siguiente tabla fue considerando los agregados nuevos de aportación y los agregados obtenidos del RAP.

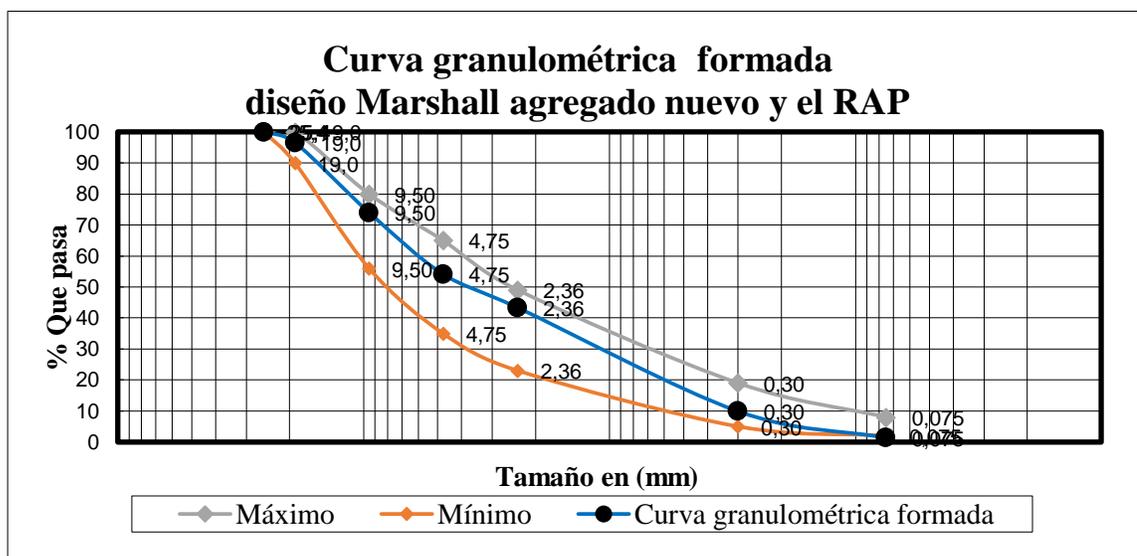
Tabla 4.3.1. Granulometría de la combinación del agregado nuevo y el RAP

60 % Agregado nuevo			40 % RAP	Total			
30 %	25 %	45 %	40 %	Peso retenido	Retenido acumulado	% Retenido	% que pasa del total
Grava	Gravilla	Arena	RAP				
18 %	15 %	27 %	40 %	1,00			
0,18	0,150	0,270	0,40				
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
71,52	0,00	0,00	31,89	103,40	103,40	3,45	96,55
358,35	3,57	0,00	94,23	456,15	559,56	18,65	81,35
98,44	50,43	0,00	70,91	219,78	779,34	25,98	74,02
10,35	365,42	9,72	211,62	597,10	1376,43	45,88	54,12
0,06	23,34	99,31	201,62	324,33	1700,76	56,69	43,31
0,02	1,32	122,15	173,17	296,66	1997,43	66,58	33,42
0,01	0,42	220,73	117,97	339,13	2336,55	77,89	22,11
0,02	0,65	237,74	128,33	366,74	2703,29	90,11	9,89
0,12	1,26	95,66	100,47	197,51	2900,80	96,69	3,31
0,41	2,10	19,28	37,33	59,12	2959,92	98,66	1,34
0,69	1,50	5,43	32,47	40,08	3000,00	100,00	0,00
540,00	450,00	810,00	1200,00	3000,0			

Fuente: Elaboración propia

De igual forma se compacto a temperaturas arriba de los 140 °C con 75 golpes para un tráfico pesado y así poder realizar seguidamente el ensayo Marshall donde se calculó la estabilidad y la fluencia.

Gráfica 4.3:1. Curva granulométrica de agregados nuevos combinado con agregados del RAP



Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Mezcla asfáltica convencional combinado con pavimento reciclado RAP

Tabla 4.3.2 Planilla Marshall de mezcla asfáltica convencional más el RAP

PESOS ESPECÍFICOS		% de agregado
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,73	46,6
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,81	53,4
Peso Especifico Total	2,770	100

NUMERO DE GOLPES 75	
CEMENTO ASFALTICO BETUNEL 85-100	
PESO ESPECIFICO DEL LIGANTE AASHTO T-228	1,0103

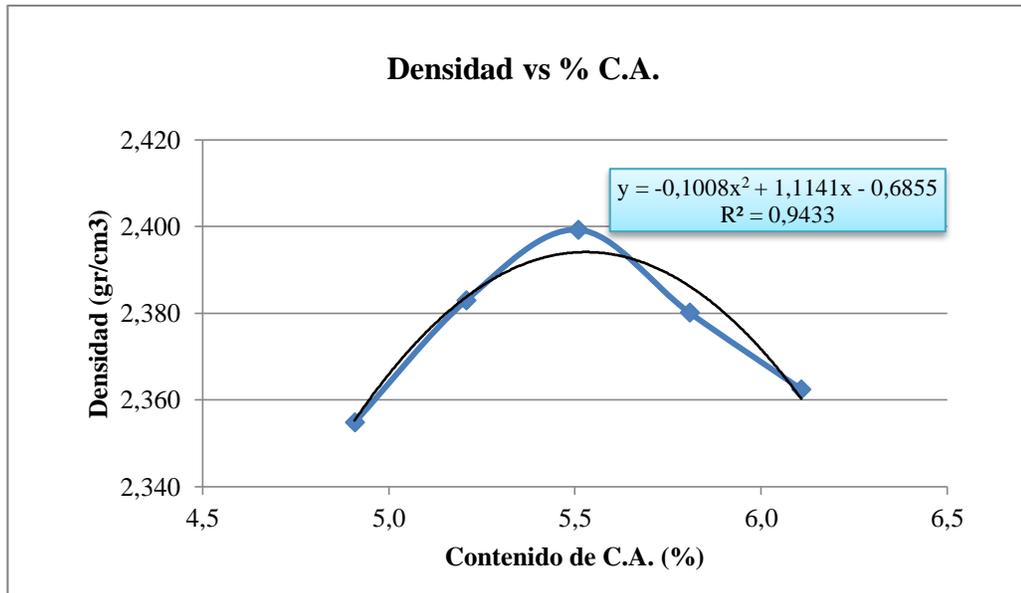
Agregado	P.E.	%
Grava	2,72	18
Gravilla	2,71	15
Arena	2,83	27
Grueso Rap	2,75	13,6
Fino Rap	2,79	26,4

N° de probeta	altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacios			Estabilidad Marshall					Fluencia		
		base Mezcla	base Agregados	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad maxima teorica	% de vacios mezcla total	V.A.M.(vacios agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacios)	lectura del dial	carga	factor de correccion de	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	fluencia real	Fluencia promedio
		%	%	grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	-	0,01 pulg
4	6,47	4,91	5,16	1195,1	1196,1	689	507,1	2,36	2,35	2,55	7,72	19,16	59,69	1239	3318,2	0,970	3218,61	4001	130	0,0512	5,51
5	5,90			1101,3	1103,8	638	465,8	2,36						1635	4384,5	1,134	4972,03		140	0,0551	
6	6,51			1194,2	1196,6	687	509,6	2,34						1481	3969,8	0,960	3811,02		150	0,0591	
7	6,39	5,21	5,49	1195,9	1197,3	696	501,3	2,39	2,38	2,54	6,17	18,46	66,56	1920	5152	0,990	5100,44	5454	130	0,0512	5,77
8	6,38			1191,8	1193,2	691	502,2	2,37						2133	5725,5	0,993	5682,58		150	0,0591	
9	6,41			1200,8	1202,4	700	502,4	2,39						2110	5663,6	0,985	5578,63		160	0,0630	
10	6,34	5,51	5,83	1200,2	1201,1	702	499,1	2,40	2,40	2,53	5,08	18,16	72,03	2328	6250,6	1,003	6269,37	6100	160	0,0630	6,56
11	6,35			1194,7	1196,0	698	498,0	2,40						2181	5854,8	1,000	5854,78		170	0,0669	
12	6,31			1193,4	1194,5	696	498,5	2,39						2275	6107,9	1,011	6175,09		170	0,0669	
13	6,47	5,81	6,17	1193,1	1194,8	691	503,8	2,37	2,38	2,52	5,39	19,07	71,75	1960	5259,7	0,970	5101,88	4636	200	0,0787	7,87
14	6,41			1195,8	1196,6	694	502,6	2,38						1659	4449,1	0,985	4382,4		190	0,0748	
15	6,45			1198,1	1198,7	698	500,7	2,39						1692	4538	0,975	4424,55		210	0,0827	
16	6,32	6,11	6,51	1192,1	1193,2	689	504,2	2,36	2,36	2,50	5,64	19,93	71,68	1257	3366,6	1,008	3393,56	3494	210	0,0827	9,055
17	6,38			1188,4	1189,5	686	503,5	2,36						1593	4271,4	0,993	4239,37		230	0,0906	
18	6,49			1184,7	1185,4	684	501,4	2,36						1103	2951,9	0,965	2848,62		250	0,0984	
ESPECIFICACIONES				mínimo							3	13	65						1800		8
				máximo							5	-	75						-		16

Fuente: Elaboración propia

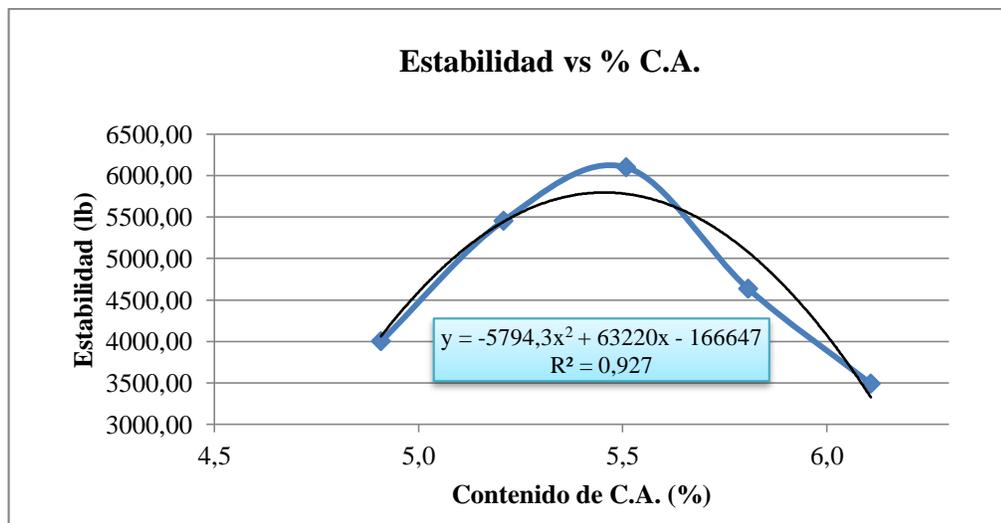
4.3.2.1. Gráficas de la resistencia Marshall de la mezcla de agregados nuevos con RAP

Gráfica 4.3:2. Densidad vs Cemento asfáltico



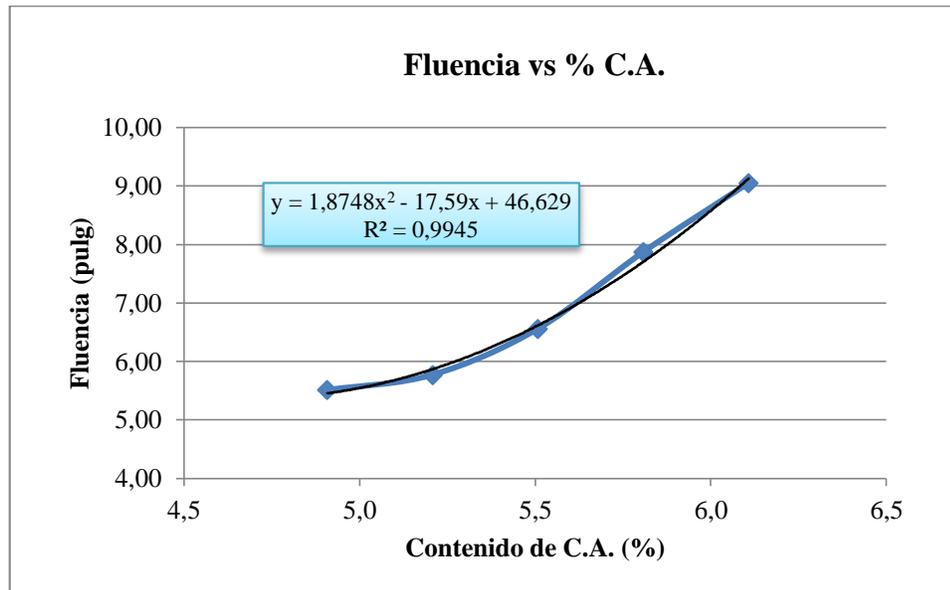
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.3:3. Estabilidad vs Cemento asfáltico



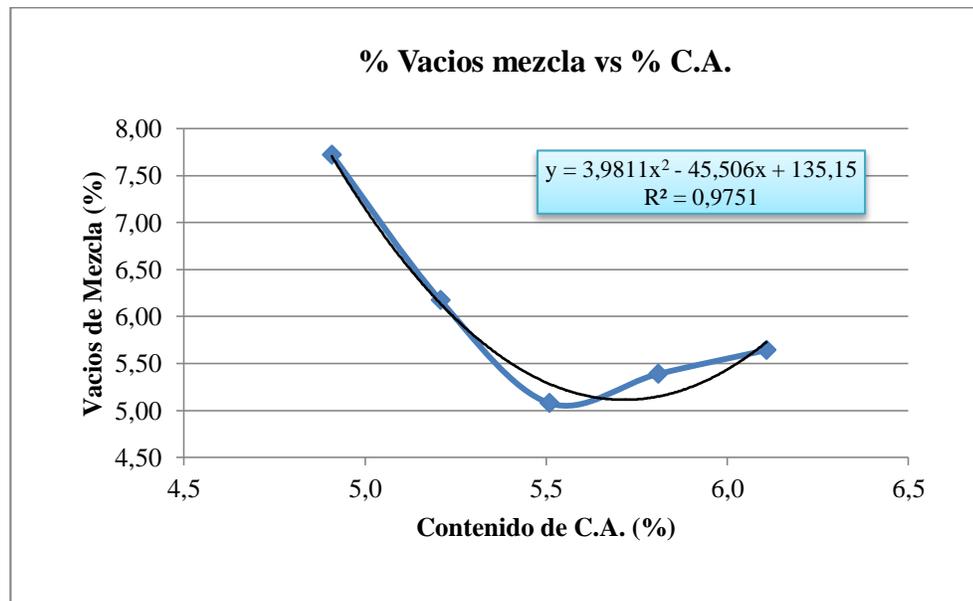
Fuente: Elaboración propia

Grafica 4.3:4. Fluencia vs Cemento asfáltico



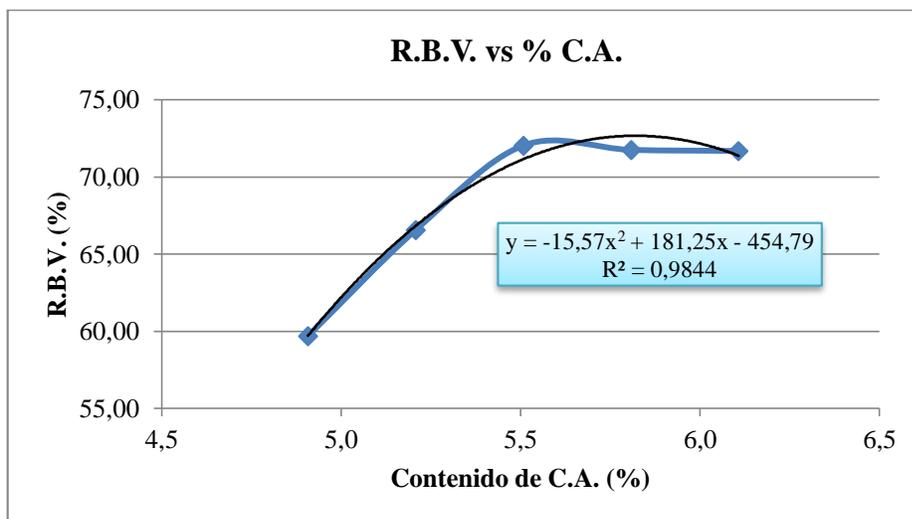
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.3:5. Vacíos de mezcla (%) vs Cemento asfáltico



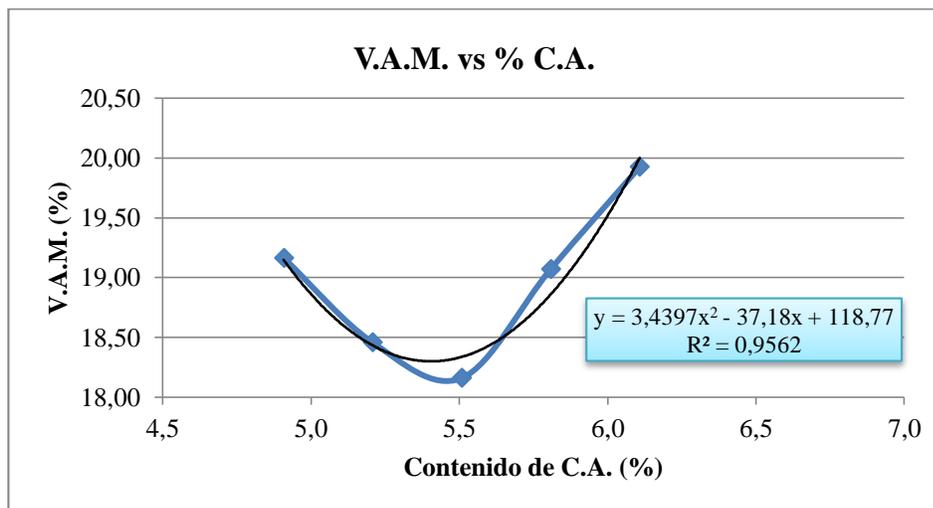
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.3:6. R.B.V. vs Cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4.3:7. V.A.M. vs Cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la mezcla asfáltica nueva (agregados nuevos) con el pavimento reciclado

Para determinar el porcentaje óptimo de esta mezcla con RAP también se consideró las ecuaciones de cada curva de las gráficas anteriores, buscando para cada resistencia un resultado que se encuentre dentro los rangos que se exige para una mezcla convencional.

Tabla 4.3.3. Resultados de mezcla convencional con RAP

Contenido de cemento asfáltico + cemento asfáltico viejo	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4,9	2,36	4000,56	5,51	7,72	59,69	19,16
5,2	2,38	5453,88	5,77	6,17	66,56	18,46
5,5	2,40	6099,74	6,56	5,08	72,03	18,16
5,8	2,38	4636,27	7,87	5,39	71,75	19,07
6,1	2,36	3493,85	9,06	5,64	71,68	19,93
X	5,53	5,46	6,09	5,72	6,24	5,41
Y máx.	2,39	5796,97	9,050	5,111	61,9	18,30

Fuente: Elaboración propia

Promedio óptimo de esta mezcla = 5,74%

El valor del porcentaje optimo fue remplazado en cada ecuación para determinar teóricamente que volares se obtendrán aproximadamente.

Tabla 4.3.4 Resultados según el porcentaje óptimo de la mezcla convencional con RAP

Valores óptimos de la mezcla con RAP				
Resistencia técnica	% óptimo de asfalto	Valores con él % optimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,74	2,39	-----	-----
Estabilidad (libra)	5,74	5327,52	> 1800 Lb.	
Fluencia (pulg)	5,74	7,43	8	14
% De vacíos de mezcla total (%)	5,74	5,11	3	5
R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	5,74	72,59	65	75
V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	5,74	18,69	> 13	

Fuente: Elaboración propia

4.4. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA UTILIZANDO MATERIAL NUEVO, PAVIMENTO RECICLADO Y EL ACEITE QUEMADO DE MOTOR COMO AGENTE REJUVENECEDOR

Para este diseño se utilizó los valores óptimos del diseño anterior donde se usó un 40 % de material reciclado y 60 % de materiales nuevos de aportación. Tomando ahora como un aditivo o agente rejuvenecedor al aceite quemado de motor, que busca en esta investigación ver, como ayuda o no a mejorar las propiedades de resistencia según el método Marshall, donde para su dosificación se tomó de la siguiente manera.

Como se usó el 40 % de pavimento reciclado para un peso de 1200 gr, entonces 480 gr es RAP que contiene un 5,51 % de asfalto viejo que se sacó del promedio de ensayos que se realizó en el extractor centrífugo, dando un peso de asfalto envejecido de 26,45 gr.

Y el promedio de porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla realizada anteriormente con RAP es de 5,74 % de un peso de 1200 gr entonces el peso del asfalto en dicha mezcla es 68,88 gr. Tomando en cuenta que de este peso, 26,45 gr es asfalto viejo y por tanto 42,43 gr es asfalto nuevo.

De tal manera que para la dosificación del aceite quemando se tomaron los porcentajes de 0 %, 5 %, 10 % y 15 % para el peso de 42,43 gr. Donde al añadir un porcentaje de aceite, se quitaba el mismo porcentaje en el asfalto nuevo.

Tabla 4.4.1 Dosificación de la mezcla con RAP y 0 % de aceite quemado de motor

Mezcla al 0% de aceite quemado de motor				
Agregados de mezcla		Ligante de la mezcla		
60%	40%			
Agregados nuevos	Agregados del rap	Asfalto envejecido (gr)	Asfalto nuevo (gr)	Aceite quemado de motor (gr)
678,67	452,45	26,45	42,43	0
Peso=	1131,12 gr.	Peso=		68,88gr.
Peso total de briqueta = 1200 gr				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4.2 Dosificación de la mezcla con RAP y 5% de aceite quemado de motor

Mezcla al 5% de aceite quemado de motor				
Agregados de mezcla		Ligante de la mezcla		
60%	40%			
Agregados nuevos	Agregados del rap	Asfalto envejecido (gr)	Asfalto nuevo (gr)	Aceite quemado de motor (gr)
678,67	452,45	26,45	40,31	2,12
Peso=	1131,12 gr.	Peso=		68,88gr.
Peso total de briqueta = 1200 gr				

Fuente: Elaboración propia

Mezcla al 10% de aceite quemado de motor				
Agregados de mezcla		Ligante de la mezcla		
60%	40%			
Agregados nuevos	Agregados del rap	Asfalto envejecido (gr)	Asfalto nuevo (gr)	Aceite quemado de motor (gr)
678,67	452,45	26,45	37,89	4,24
Peso=	1131,12 gr.	Peso=		68,88gr.
Peso total de briqueta = 1200 gr				

Fuente: Elaboración propia

Mezcla al 15% de aceite quemado de motor				
Agregados de mezcla		Ligante de la mezcla		
60%	40%			
Agregados nuevos	Agregados del rap	Asfalto envejecido (gr)	Asfalto nuevo (gr)	Aceite quemado de motor (gr)
678,67	452,45	26,45	35,76	6,37
Peso=	1131,12 gr.	Peso=		68,88gr.
Peso total de briqueta = 1200 gr				

Fuente: Elaboración propia

Esta dosificación se usara para un peso 1200 gr donde 480 gr serán pavimento reciclado triturado y 720 gr de material nuevo incluido la dosificación de cemento asfaltico y aceite quemado. Para el ensayo de igual forma se siguió el mismo procedimiento que exige el

método Marshall, donde se compacta a temperatura más de 140 °C con 75 golpes para un tráfico pesado.

Imagen 4.4:1. Pesado de la mezcla con pavimento reciclado y aceite quemado de motor



Fuente: Elaboración propia

Imagen 4.4:2. Briqueta mezclada con un 15 % de A.Q.M.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 4.4:3. Medición de la estabilidad y la fluencia Marshall



Fuente: Elaboración propia

Imagen 4.4:4 Briquetas compactadas



Fuente: Elaboración propia

4.4.1. Mezcla con pavimento reciclado y 0 % de aceite quemado de motor

Tabla 4.4.3. Marshall de la mezcla con RAP y 0 % de aceite quemado de motor

PESOS ESPECÍFICOS			% de agregado		NUMERO DE GOLPES 75				Agregado			P.E.		%			
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,73	46,6	CEMENTO ASFALTICO BETUNEL 85-100				Grava	2,72	18	Gravilla		2,71	15	Arena		2,83	27
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,81	53,4	PESO ESPECIFICO DEL LIGANTE AASHTO T-228				1,0103	Grueso Rap		2,75	13,6	Fino Rap		2,79	26,4		
Peso Especifico Total	2,770	100															

N° de probeta	altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacios			Estabilidad Marshall					Fluencia			
		base Mezcla	base Agregados	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad maxima teorica	% de vacios mezcla total	V.A.M.(vacios agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacios)	lectura del dial	carga	factor de correccion de	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	fluencia real	Fluencia promedio	
		%	%	grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	-	0,01 pulg	
1	6,59			1195,7	1196,9	696	500,9	2,39					1955	5246,2	0,945	4957,662		180	0,071			
2	6,56	5,74	6,10	1190,8	1192,1	691	501,1	2,38	2,383	2,52	5,37	18,93	71,63	1994	5351,2	0,951	5087,407	5118	190	0,075	7,218	
3	6,58			1202,6	1203,3	699	504,3	2,38						2089	5607	0,947	5309,304		180	0,071		
4	6,48			1179,4	1180,2	683	497,2	2,37						2025	5434,7	0,968	5258,071		200	0,0787		
5	6,49	5,74	6,10	1193,9	1195,1	696	499,1	2,39	2,381	2,52	5,46	19,00	71,29	1844	4947,3	0,965	4774,146	5004	170	0,0669	7,35	
6	6,45			1192,6	1193,6	692	501,6	2,38						1903	5106,2	0,975	4978,523		190	0,0748		
7	6,61			1192,3	1193,9	691	502,9	2,37						1928	5173,5	0,941	4869,813		190	0,0748		
8	6,55	5,74	6,10	1185,0	1185,7	687	498,7	2,38	2,378	2,52	5,57	19,10	70,83	2195	5892,5	0,953	5612,582	5195	190	0,0748	7,74	
9	6,59			1197,3	1197,8	696	501,8	2,39						2012	5399,7	0,945	5102,709		210	0,0827		
10	6,54			1196,7	1197,6	697	500,6	2,39						1954	5243,5	0,954	5004,406		180	0,0709		
11	6,51	5,74	6,10	1191,2	1192,5	692	500,5	2,38	2,388	2,52	5,17	18,76	72,43	2118	5685,1	0,960	5457,724	5429	190	0,0748	7,22	
12	6,47			1167,9	1168,1	680	488,1	2,39						2237	6005,6	0,970	5825,405		180	0,0709		
13	6,54			1189,6	1191,3	692	499,3	2,38						1865	5003,9	0,954	4775,675		210	0,0827		
14	6,51	5,74	6,10	1192,3	1193,1	694	499,1	2,39	2,386	2,52	5,24	18,82	72,14	2198	5900,6	0,960	5664,531	5215	205	0,0807	7,94	
15	6,45			1174,6	1175,2	683	492,2	2,39						1989	5337,8	0,975	5204,314		190	0,0748		
ESPECIFICACIONES				mínimo						3	13	65						1800				8
				máximo						5	-	75						-				16

Fuente: Elaboración propia

4.4.1.1. Tratamiento estadístico básico de las mezclas con pavimento reciclado y 0 % aceite quemado de motor

Tabla 4.4.4. Tratamiento estadístico con 0 % de aceite

N°	Estabilidad	N°	Flujo
1	4957,66	1	7,10
2	5087,41	2	7,50
3	5309,30	3	7,10
4	5258,07	4	7,87
5	4774,15	5	6,69
6	4978,52	6	7,48
7	4869,81	7	7,48
8	5612,58	8	7,48
9	5102,71	9	8,27
10	5004,41	10	7,09
11	5457,72	11	7,48
12	5825,41	12	7,09
13	4775,68	13	8,27
14	5664,53	14	8,07
15	5204,31	15	7,48

Sumatoria	77882,27	112,45
Numero de datos	15,00	15,00
Media	5182,72	7,48
Desviación (sd)	326,95	0,46
Mediana	5102,71	7,48

Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Mezcla con pavimento reciclado y 5 % de aceite quemado de motor

Tabla 4.4.5 Marshall de la mezcla con RAP y 5 % de aceite quemado de motor

PESOS ESPECÍFICOS		% de agregado		NUMERO DE GOLPES 75			Agregado			P.E.			%					
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,73	46,6		CEMENTO ASFALTICO BETUNEL 85-100			Grava	2,72	18		Gravilla	2,71	15		Arena	2,83	27	
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,81	53,4		PESO ESPECIFICO DEL LIGANTE AASHTO T-228			1,0055	Grueso Rap	2,75	13,6		Fino Rap	2,79	26,4				
Peso Especifico Total	2,77	100																

N° de probeta	altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen probeta	Densidad Briqueta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Fluencia		
		base Mezcla	base Agregados	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua		densidad real	Densidad promedio	densidad maxima teorica	% de vacios mezcla total	V.A.M.(vacios agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacios)	lectura del dial	carga	factor de correccion de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	fluencia real	Fluencia promedio
		%	%	grs.	grs.	grs.		cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	-
1	6,59	5,75	6,10	1194,6	1196,5	696	500,5	2,39	2,384	2,52	5,27	18,90	72,13	1189	3183,5	0,945	3008,42	3078	150	0,059	6,037
2	6,64			1198,3	1200,7	698	502,7	2,38						1105	2957,3	0,936	2767,17		160	0,063	
3	6,56			1200,8	1202,4	698	504,4	2,38						1358	3638,6	0,951	3459,22		150	0,059	
4	6,52	5,75	6,10	1192,0	1194,6	694	500,6	2,38	2,382	2,52	5,35	18,97	71,79	1005	2688	0,958	2575,41	3112	160	0,0630	6,17
5	6,50			1187,7	1189,0	689	500,0	2,38						1244	3331,6	0,963	3206,69		160	0,0630	
6	6,49			1192,0	1193,1	694	499,1	2,39						1374	3681,7	0,965	3552,83		150	0,0591	
7	6,49	5,75	6,10	1178,6	1181,7	688	493,7	2,39	2,387	2,52	5,13	18,78	72,68	1098	2938,5	0,965	2835,63	3258	150	0,0591	6,30
8	6,45			1187,4	1191,2	693	498,2	2,38						1295	3469	0,975	3382,23		160	0,0630	
9	6,49			1183,4	1185,0	690	495,0	2,39						1375	3684,4	0,965	3555,43		170	0,0669	
10	6,43	5,75	6,10	1186,3	1189,0	693	496,0	2,39	2,385	2,52	5,20	18,84	72,38	1278	3423,2	0,980	3354,71	3211	170	0,0669	6,82
11	6,44			1185,0	1188,3	691	497,3	2,38						1219	3264,3	0,978	3190,86		170	0,0669	
12	6,47			1179,2	1181,2	686	495,2	2,38						1189	3183,5	0,970	3088,01		180	0,0709	
13	6,41	5,75	6,10	1183,6	1187,9	691	496,9	2,38	2,388	2,52	5,08	18,74	72,88	1145	3065	0,985	3019,06	3317	150	0,0591	6,17
14	6,45			1185,2	1189,2	693	496,2	2,39						1371	3673,6	0,975	3581,77		160	0,0630	
15	6,48			1181,0	1183,2	690	493,2	2,39						1293	3463,6	0,968	3351		160	0,0630	
ESPECIFICACIONES				mínimo						3	13	65				1800	8				
				máximo						5	-	75				-	16				

Fuente: Elaboración propia

4.4.2.1. Tratamiento estadístico básico de las mezclas con pavimento reciclado y 5 % de aceite quemado

Tabla 4.4.6. Tratamiento estadístico con 5 % de aceite

N°	Estabilidad	N°	Flujo
1	3008,42	1	5,9
2	2767,17	2	6,3
3	3459,22	3	5,9
4	2575,41	4	6,3
5	3206,69	5	6,3
6	3552,83	6	5,91
7	2835,63	7	5,91
8	3382,23	8	6,3
9	3555,43	9	6,69
10	3354,71	10	6,69
11	3190,86	11	6,69
12	3088,01	12	7,09
13	3019,06	13	5,91
14	3581,77	14	6,3
15	3351,00	15	6,3

Sumatoria	47928,44	94,49
Numero de datos	15,00	15,00
Media	3180,76	6,29
Desviación (sd)	308,88	0,364
Mediana	3206,69	6,30

Fuente: Elaboración propia

4.4.3. Mezcla con pavimento reciclado y 10 % de aceite quemado

Tabla 4.4.7. Marshall de la mezcla con RAP y 10 % de aceite quemado de motor

PESOS ESPECÍFICOS		% de agregado		NUMERO DE GOLPES 75				Agregado			P.E.		%	
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,73	46,6		CEMENTO ASFALTICO BETUNEL 85-100				Grava	2,72	18				
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,81	53,4		PESO ESPECIFICO DEL LIGANTE AASHTO T-228				Gravilla	2,71	15				
Peso Especifico Total	2,77	100						Arena	2,83	27				
								Grueso Rap	2,75	13,6				
								Fino Rap	2,79	26,4				

N° de probeta	altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacios			Estabilidad Marshall				Fluencia				
		base Mezcla	base Agregados	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad maxima teorica	% de vacios mezcla total	V.A.M.(vacios agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacios)	lectura del dial	carga	factor de correccion de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	fluencia real	Fluencia promedio	
		%	%	grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	-	0,01 pulg	
1	6,47			1190,8	1192,1	692	500,1	2,38					1008	2696,1	0,970	2615,2375		120	0,047			
2	6,60	5,75	6,10	1200,5	1202,6	699	503,6	2,38	2,382	2,51	5,26	18,95	72,25	959	2564,2	0,943	2418,5288	2601	150	0,059	5,118	
3	6,53			1199,2	1201,6	698	503,6	2,38						1082	2895,4	0,956	2768,8599		120	0,047		
4	6,52			1192,3	1195,0	693	502,0	2,38						1036	2771,5	0,958	2655,3929		140	0,0551		
5	6,57	5,75	6,10	1195,6	1196,6	697	499,6	2,39	2,385	2,51	5,13	18,85	72,76	1117	2989,6	0,949	2836,5669	2694	130	0,0512	5,25	
6	6,53			1189,4	1191,2	693	498,2	2,39						1013	2709,6	0,956	2591,1763		130	0,0512		
7	6,49			1179,6	1181,4	688	493,4	2,39						1028	2750	0,965	2653,7279		140	0,0551		
8	6,52	5,75	6,10	1185,4	1186,8	691	495,8	2,39	2,389	2,51	4,97	18,70	73,45	995	2661,1	0,958	2549,614	2685	150	0,0591	5,38	
9	6,47			1187,6	1190,6	693	497,6	2,39						1099	2941,2	0,970	2852,9309		120	0,0472		
10	6,48			1183,2	1184,1	689	495,1	2,39						954	2550,7	0,968	2467,8118		130	0,0512		
11	6,47	5,75	6,10	1188,9	1191,6	693	498,6	2,38	2,384	2,51	5,19	18,89	72,53	1047	2801,1	0,970	2717,1061	2667	140	0,0551	5,12	
12	6,46			1198,5	1200,2	696	504,2	2,38						1082	2895,4	0,973	2815,7651		120	0,0472		
13	6,41			1168,5	1171,9	681	490,9	2,38						1102	2949,2	0,985	2905,0057		140	0,0551		
14	6,43	5,75	6,10	1179,9	1182,4	687	495,4	2,38	2,381	2,51	5,29	18,98	72,14	1098	2938,5	0,980	2879,7037	2777	140	0,0551	5,51	
15	6,49			1164,6	1166,9	678	488,9	2,38						987	2639,6	0,965	2547,1873		140	0,0551		
ESPECIFICACIONES				mínimo							3	13	65					1800				8
				máximo							5	-	75					-				16

Fuente: Elaboración propia

4.4.3.1. Tratamiento estadístico básico de las mezclas con pavimento reciclado y 10 % de aceite quemado

Tabla 4.4.8. Tratamiento estadístico con 10 % de aceite quemado de motor

N°	Estabilidad	N°	Flujo
1	2615,2375	1	4,7
2	2418,5288	2	5,9
3	2768,8599	3	4,7
4	2655,3929	4	5,51
5	2836,5669	5	5,12
6	2591,1763	6	5,12
7	2653,7279	7	5,51
8	2549,614	8	5,91
9	2852,9309	9	4,72
10	2467,8118	10	5,12
11	2717,1061	11	5,51
12	2815,7651	12	4,72
13	2905,0057	13	5,51
14	2879,7037	14	5,51
15	2547,1873	15	5,51

Sumatoria	40274,615	79,070
Numero de datos	15,000	15,000
Media	2680,804	5,256
Desviación (sd)	154,382	0,420
Mediana	2655,393	5,510

Fuente: Elaboración propia

4.4.4. Mezcla con pavimento reciclado y 15 % de aceite quemado

Tabla 4.4.9 Marshall de la mezcla con RAP y 15 % de aceite quemado de motor

PESOS ESPECÍFICOS		% de agregado
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,73	46,6
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,81	53,4
Peso Específico Total	2,77	100

NUMERO DE GOLPES 75	
CEMENTO ASFALTICO BETUNEL 85-100	
PESO ESPECIFICO DEL LIGANTE AASHTO T-228+A.Q.M.	0,9961

Agregado	P.E.	%
Grava	2,72	18
Gravilla	2,71	15
Arena	2,83	27
Grueso Rap	2,75	13,6
Fino Rap	2,79	26,4

N° de probeta	altura de probeta	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen	Densidad Briqueta			% de Vacios			Estabilidad Marshall					Fluencia		
		base Mezcla	base Agregados	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	probeta	densidad real	Densidad promedio	densidad maxima teorica	% de vacios mezcla total	V.A.M.(vacios agregado mineral)	R.B.V. (relacion betumen vacios)	lectura del dial	carga	factor de correccion de altura de probeta	Estabilidad real corregida	Estabilidad promedio	lectura dial del flujo	fluencia real	Fluencia promedio
		%	%	grs.	grs.	grs.	cc	grs/cm3	grs/cm3	grs/cm3	%	%	%	mm	libras	-	libras	libras	-	-	0,01 pulg
1	6,53			1200,8	1203,1	699	504,1	2,38					689	1837,1	0,956	1756,836		100	0,039		
2	6,52	5,75	6,10	1198,6	1200,1	698	502,1	2,39	2,385	2,51	5,09	18,86	72,99	701	1869,4	0,958	1791,102	1872	110	0,043	4,068
3	6,51			1196,2	1199,5	698	501,5	2,39						807	2154,9	0,960	2068,674		100	0,039	
4	6,55			1198,8	1200,2	699	501,2	2,39						725	1934,1	0,953	1842,191		100	0,0394	
5	6,53	5,75	6,10	1195,7	1196,1	696	500,1	2,39	2,390	2,51	4,89	18,69	73,81	744	1985,2	0,956	1898,468	1785	100	0,0394	4,20
6	6,52			1190,4	1191,7	693	498,7	2,39						633	1686,3	0,958	1615,664		120	0,0472	
7	6,62			1184,2	1187,1	691	496,1	2,39						828	2211,4	0,939	2077,405		110	0,0433	
8	6,61	5,75	6,10	1197,6	1200,1	697	503,1	2,38	2,384	2,51	5,13	18,89	72,83	695	1853,3	0,941	1744,487	1896	120	0,0472	4,46
9	6,60			1195,2	1198,3	697	501,3	2,38						741	1977,1	0,943	1864,842		110	0,0433	
10	6,43			1189,6	1191,9	693	498,9	2,38						654	1742,9	0,980	1708,013		110	0,0433	
11	6,56	5,75	6,10	1199,3	1202,4	700	502,4	2,39	2,388	2,51	4,98	18,76	73,47	714	1904,4	0,951	1810,549	1797	100	0,0394	4,07
12	6,49			1178,0	1180,4	688	492,4	2,39						727	1939,4	0,965	1871,564		100	0,0394	
13	6,60			1197,1	1199,5	698	501,5	2,39						765	2041,8	0,943	1925,798		100	0,0394	
14	6,52	5,75	6,10	1199,6	1201,2	699	502,2	2,39	2,389	2,51	4,95	18,73	73,59	698	1861,4	0,958	1783,362	1879	110	0,0433	4,33
15	6,55			1194,5	1196,7	697	499,7	2,39						758	2022,9	0,953	1926,832		120	0,0472	
ESPECIFICACIONES				mínimo						3	13	65				1800				8	
				máximo						5	-	75				-				16	

Fuente: Elaboración propia

4.4.4.1. Tratamiento estadístico básico de las mezclas con pavimento reciclado y 15 % de aceite quemado

Tabla 4.4.10. Tratamiento estadístico con 15 % de aceite quemado de motor

N°	Estabilidad	N°	Flujo
1	1756,84	1	3,90
2	1791,10	2	4,30
3	2068,67	3	3,90
4	1842,19	4	3,94
5	1898,47	5	3,94
6	1615,66	6	4,72
7	2077,40	7	4,33
8	1744,49	8	4,72
9	1864,84	9	4,33
10	1708,01	10	4,33
11	1810,55	11	3,94
12	1871,56	12	3,94
13	1925,79	13	3,94
14	1783,36	14	4,33
15	1926,83	15	4,72

Sumatoria	27685,78	63,28
Numero de datos	15,00	15,00
Media	1841,81	4,21
Desviación (sd)	124,88	0,31
Mediana	1842,19	4,30

Fuente: Elaboración propia

4.4.5. Resultados del diseño de la mezcla asfáltica utilizando material nuevo, pavimento reciclado y el aceite quemado de motor como agente rejuvenecedor

Los resultados están separados para cada porcentaje de aceite quemado de motor que se realizó en las mezclas.

Mezcla con 0 % de aceite quemado

Tabla 4.4.11. Resultados con 0 % de aceite quemado de motor

Contenido de cemento asfáltico + aceite quemado de motor	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
5,74	2,38	5118,12	7,22	5,37	71,63	18,93
5,74	2,38	5003,58	7,35	5,46	71,29	19,00
5,74	2,38	5195,03	7,74	5,57	70,83	19,10
5,74	2,39	5429,18	7,22	5,17	72,43	18,76
5,74	2,38	5214,84	7,94	5,24	72,14	18,82
Promedio	2,38	5192,15	7,49	5,36	71,66	18,92

Fuente: Elaboración propia

Mezcla con 5 % de aceite quemado

Tabla 4.4.12. Resultado de mezcla con 5 % de aceite quemado de motor

Contenido de cemento asfáltico + aceite quemado de motor	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
5,74	2,38	3078,27	6,04	5,27	72,13	18,90
5,74	2,38	3111,64	6,17	5,35	71,79	18,97
5,74	2,39	3257,76	6,30	5,13	72,68	18,78
5,74	2,38	3211,19	6,82	5,20	72,38	18,84
5,74	2,39	3317,28	6,17	5,08	72,88	18,74
Promedio	2,38	3195,23	6,29	5,21	72,37	18,85

Fuente: Elaboración propia

Mezcla con 10 % de aceite quemado

Tabla 4.4.13. Resultado de la mezcla con 10 % de aceite quemado de motor

Contenido de cemento asfáltico + aceite quemado de motor	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
5,74	2,382	2600,88	5,12	5,26	72,25	18,95
5,74	2,385	2694,38	5,25	5,13	72,76	18,85
5,74	2,389	2685,42	5,38	4,97	73,45	18,70
5,74	2,384	2666,89	5,12	5,19	72,53	18,89
5,74	2,381	2777,30	5,51	5,29	72,14	18,98
Promedio	2,384	2684,974	5,276	5,167	72,624	18,874

Fuente: Elaboración propia

Mezcla con 15 % de aceite quemado

Tabla 4.4.14. Resultado de la mezcla con 15% de aceite quemado de motor

Contenido de cemento asfáltico + aceite quemado de motor	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
5,74	2,38	1872,20	4,07	5,09	72,99	18,86
5,74	2,39	1785,44	4,20	4,89	73,81	18,69
5,74	2,39	1895,58	4,46	5,13	72,83	18,89
5,74	2,39	1796,71	4,07	4,98	73,47	18,76
5,74	2,39	1878,66	4,33	4,95	73,59	18,73
Promedio	2,39	1845,72	4,23	5,01	73,34	18,79

Fuente: Elaboración propia

4.4.6. Evaluación y resultados del diseño de la mezcla asfáltica nueva (agregados nuevos) con el pavimento reciclado

4.4.6.1. Mezcla asfáltica convencional

Tabla 4.4.15 Resultados óptimos de la mezcla convencional

Resistencia técnica	% óptimo de asfalto	Valores con él % óptimo
Densidad promedio (gr/cm ³)	5,66	2,403
Estabilidad (libra)	5,66	2880,621
Fluencia (pulg)	5,66	9,014
% De vacíos de mezcla total (%)	5,66	4,554
R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	5,66	74,605
V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	5,66	18,014

Fuente: Elaboración propia

Promedio % asfalto = 5,66 %

En la siguiente tabla de resultados se puede observar los valores promedios de cada una de las propiedades de resistencia Marshall para verificar que la mezcla convencional cumple con todos los parámetros mínimos de diseño. Teniendo una estabilidad mayor a 1800 lb, una fluencia que se encuentra dentro un rango mínimo de 8 – 11, el porcentaje de vacíos está dentro del rango de 3 – 5 y la relación de betún vacío está dentro los 65 – 75 que se exige. Por tanto tenemos una mezcla con materiales nuevos que cumplen con los parámetros mínimos para una carretera de tráfico pesado.

4.4.6.2. Mezcla asfáltica con pavimento reciclado

Tabla 4.4.16 Resultados óptimos de la mezcla con pavimento reciclado

Resistencia técnica	% óptimo de asfalto	Valores con él % óptimo
Densidad promedio (gr/cm ³)	5,74	2,38
Estabilidad (libra)	5,74	5192,15
Fluencia (pulg)	5,74	7,49
% de vacíos de mezcla total (%)	5,74	5,36
R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	5,74	71,66
V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	5,74	18,92

Fuente: Elaboración propia

Promedio de % de asfalto = 5,74 %

En la tabla siguiente se tiene los valores promedios de resistencia de la mezcla con 60 % de materiales nuevos y 40 % de pavimento reciclado, donde no se cumple con todos los parámetros de diseño, como es el caso de la fluencia está al límite del rango mínimo (8-14pulg.) con 7,49 pulg, el porcentaje de vacíos es 5,11 % estando al límite (3-5%) ya que lo máximo es 5 %.

La estabilidad da un resultado muy alto de 5192,15 libras cumpliendo ya que es mayor a 1800 libras que es lo mínimo que se exige y los demás valores de resistencia son valores más aceptables que también cumplen.

El porcentaje óptimo de esta mezcla con pavimento reciclado es 5,74 % que se calculó del promedio de cada propiedad de resistencia, donde 3,54 % es asfalto nuevo y 2,20% es asfalto viejo que se consideró del porcentaje contenido en el pavimento reciclado.

4.4.7. Evaluación y resultados del diseño de la mezcla asfáltica nueva (agregados nuevos) con el pavimento reciclado y el aceite quemado de motor

4.4.7.1. Resultados de la mezcla con 5 %

Tabla 4.4.17. Resultado al 5 % de aceite quemado de motor

Contenido de cemento asfáltico + aceite quemado de motor con 5%	Resistencia técnica	C. asfáltico nuevo %	C. asfáltico viejo %	Aceite %	% de asfalto nuevo + viejo + aceite
Densidad promedio (gr/cm ³)	2,39	3,36	2,20	0,18	5,74
Estabilidad (libra)	3195,23	3,36	2,20	0,18	5,74
Fluencia (pulg)	6,30	3,36	2,20	0,18	5,74
% De vacíos de mezcla total (%)	5,21	3,36	2,20	0,18	5,74
R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	72,37	3,36	2,20	0,18	5,74
V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	18,85	3,36	2,20	0,18	5,74

Fuente: Elaboración propia

En los siguientes resultados tenemos los valores promedios de las propiedades de resistencia de la mezcla, donde evaluando el porcentaje de 5 % de aceite quemado de

motor se observa que los resultados de estabilidad, relación betún vacíos y vacíos de agregado mineral si cumplen dentro del rango de lo que exige el diseño y a comparación de la fluencia es 6,3 pulg que está por debajo de 8 que es lo mínimo que se acepta, el porcentaje de vacíos en esta mezcla es 5,21 % resultado próximo y aceptable al rango superior de 5 % para un tráfico pesado.

4.4.7.2. Resultados de la mezcla con 10 %

Tabla 4.4.18. Resultado al 10 % de aceite quemado de motos

Contenido de cemento asfáltico + aceite quemado de motor con 10%	Resistencia técnica	C. asfáltico nuevo %	C. asfáltico viejo %	Aceite %	% de asfalto nuevo + viejo + aceite
Densidad promedio (gr/cm ³)	2,38	3,18	2,20	0,35	5,74
Estabilidad (libra)	2684,97	3,18	2,20	0,35	5,74
Fluencia (pulg)	5,28	3,18	2,20	0,35	5,74
% De vacíos de mezcla total (%)	5,17	3,18	2,20	0,35	5,74
R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	72,62	3,18	2,20	0,35	5,74
V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	18,87	3,18	2,20	0,35	5,74

Fuente: Elaboración propia

En la mezcla con 10 % de aceite quemado tenemos el valor promedio de cada propiedad de resistencia donde aún se mantiene resultados dentro los rangos que se exige en un diseño de mezclas asfálticas que si cumplen, la relación betún vacíos, vacíos de agregado mineral, y la estabilidad que esta sobre los 1800 lb que es un valor que bajo más comparado con la mezcla del 5 % de aceite.

Pero con una fluencia más desfavorable de 5,28 pulg estando por debajo del rango mínimo de 8-14 pulg que no cumple y en cuanto al valor del porcentaje de vacíos tiende a bajar pero aún no se encuentra dentro el rango de 3-5 %.

4.4.7.3. Resultados de la mezcla con 15 %

Tabla 4.4.19. Resultado al 15 % de aceite quemado de motor

Contenido de cemento asfáltico + aceite quemado de motor con 15%	Resistencia técnica	C. asfáltico nuevo %	C. asfáltico viejo %	Aceite %	% de asfalto nuevo + viejo + aceite
Densidad promedio (gr/cm ³)	2,39	3,01	2,20	0,53	5,74
Estabilidad (libra)	1845,72	3,01	2,20	0,53	5,74
Fluencia (pulg)	4,23	3,01	2,20	0,53	5,74
% De vacíos de mezcla total (%)	5,01	3,01	2,20	0,53	5,74
R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	73,34	3,01	2,20	0,53	5,74
V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)	18,79	3,01	2,20	0,53	5,74

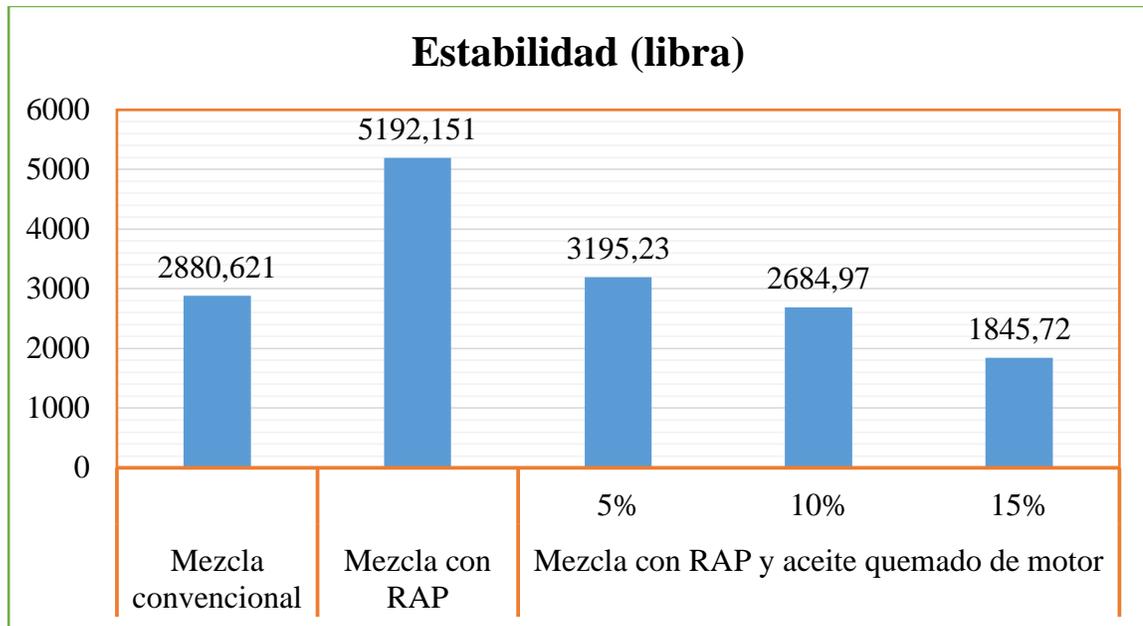
Fuente: Elaboración propia

En el porcentaje del 15 % de aceite quemado de motor de la mezcla, el porcentaje de vacíos, la relación betún vacío, los vacíos de agregado mineral y la estabilidad cumplen con los rangos de diseño, estando al límite de lo que se exige.

Pero la fluencia baja aún más a comparación de la mezcla con porcentaje de 10% de aceite quemado su valor baja más de 8pulg que es el rango mínimo que se exige y paralelamente también bajo la estabilidad que aun cumple con 1845,72 libras estando al límite de lo permite el diseño Marshall para un tráfico pesado.

4.4.8. Análisis de las propiedades de resistencia de cada mezcla realizada

Gráfica 4.4:1 Estabilidades de cada mezcla diseñada



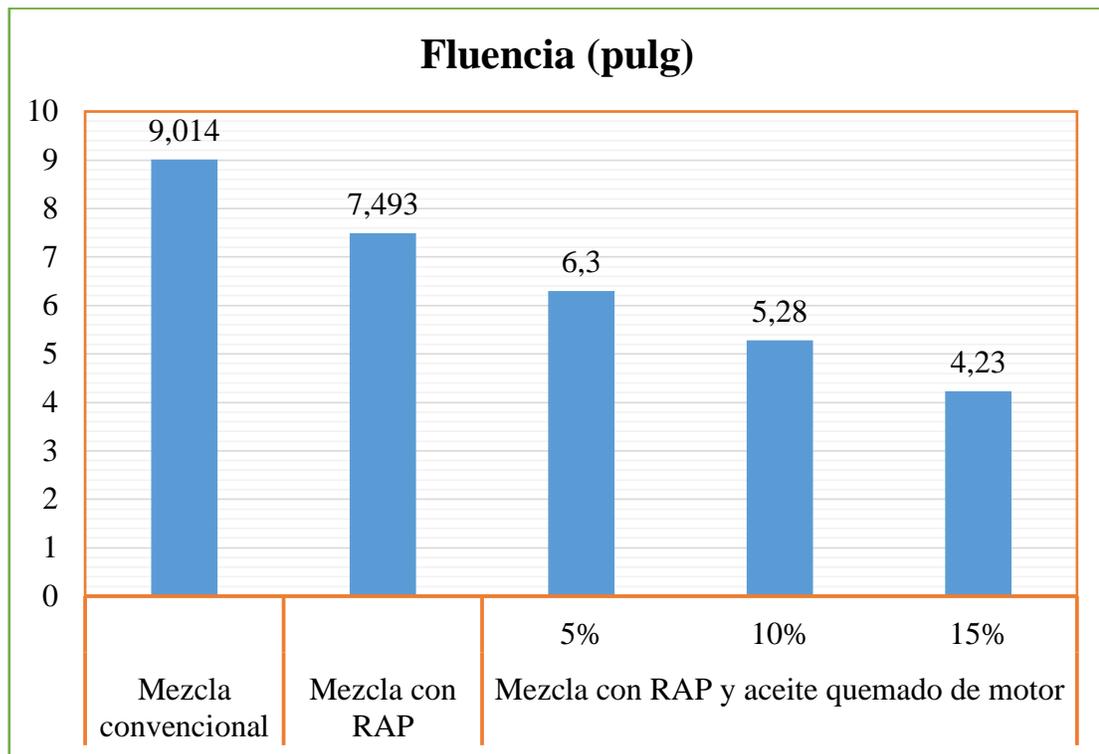
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el diseño o método Marshall se tiene como parámetro que la propiedad de la estabilidad sea mayor a 1800 libras. Viendo en la gráfica de estabilidades se puede observar que la mezcla convencional cumple ya que se diseñó con materiales nuevos.

En la mezcla con pavimento reciclado o (RAP) se tiene una estabilidad alta donde se diseñó con 60 % de materiales nuevos y 40 % de RAP. El tener una estabilidad alta con porcentajes de vacíos bajo se define como una mezcla muy rígida ya que es el producto de implementar el RAP en la mezcla, tomando en cuenta que es un material que casi ya cumplió su vida útil y perdió varias de sus propiedades y se tienen agregados envejecidos.

Analizando las mezclas con RAP que contienen aceite quemado de motor en 5 %, 10 % y 15% se ve que las estabilidades cumplen, pero a medida que se aumenta el porcentaje de aceite la estabilidad baja. Esto se debe a que aceite quemado motor actúa como un aditivo rejuvenecedor de las propiedades de estabilidad. Pero se considera que el aceite actúa hasta un porcentaje de 5% ya que la estabilidad baja de 5192,15 libras a 3195.23 libras causando un gran efecto a comparación de los porcentajes de 10 y 15%.

Gráfica 4.4:2 Fluencia de cada mezcla diseñada



Fuente: Elaboración propia

La fluencia según el método Marshall sus parámetros de diseño de un tráfico pesado están entre un rango de 8 – 14 pulgadas. Y en el grafico observamos que:

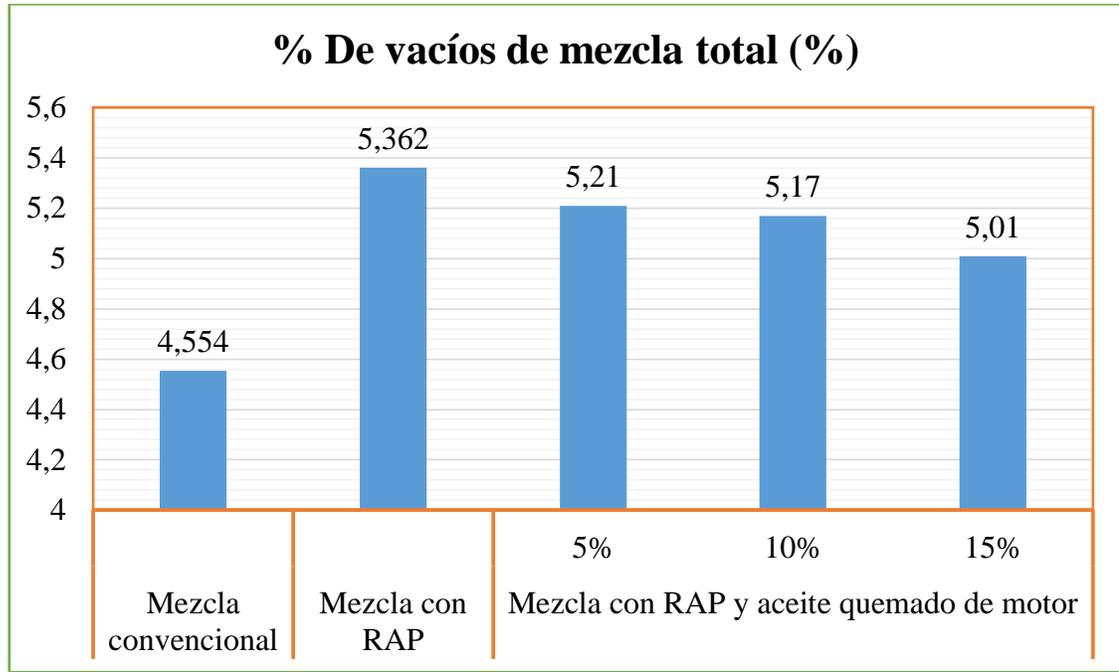
La mezcla convencional cumple con los parámetros de diseño con un valor de 9,014 pulgadas estando dentro del rango que se exige ya que esto se debe a que se trabajó con agregados nuevos que están actos para un diseño.

En la mezcla con pavimento reciclado la fluencia es 7,49 pulg que no cumple porque está por debajo del límite de 8 pulg considerando que como el pavimento reciclado es un material que perdió sus propiedades causa una mezcla muy rígida y la fluencia entra en conflicto con los requisitos de la estabilidad. Definiendo que usar 40% de este pavimento reciclado es demasiado para nuestra mezcla, obteniendo una mezcla frágil.

Analizando la mezcla de pavimento reciclado (RAP) y los distintos porcentajes de 5 %, 10 % y 15 % de aceite quemado de motor la fluencia no cumplen con los rangos de 8-14 pulg y se ve que al aumentar mayor cantidad de aceite baja más la fluencia tomando en

cuenta que se parte de una fluencia que no cumple, entonces el aceite causa un efecto negativo para esta propiedad ya que lo ideal sería que suba el valor de la fluencia.

Gráfica 4.4:3 Porcentaje de vacíos de cada mezcla diseñada



Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de vacíos de aire según el método Marshall sus parámetros de diseño están entre un 3 – 5 por ciento. Y en el grafico observamos que:

La mezcla convencional cumple dentro del rango de los parámetros de diseño que se indica para un tráfico pesado con un 4,55 % ya que fue realizada con materiales nuevos teniendo una mezcla acta para una aplicación.

La mezcla asfáltica con pavimento reciclado presenta un porcentaje de vacíos fuera del rango de diseño que es 3-5 % obteniendo un resultado de 5,36% definiendo que se tiene una mezcla permeable donde puede existir circulación de aire o agua que deterioran la mezcla ocasionando un endurecimiento prematuro. Esto se debe al pavimento reciclado ya que se tiene un porcentaje alto en la dosificación de la mezcla.

Analizando las mezclas con aceite quemado de motor en los porcentajes de 5 %, 10 % y 15 %, el porcentaje de vacíos es proporcional al porcentaje de aceite quemado de motor

de la mezcla, es decir que a mayor cantidad de aceite baja el porcentaje de vacíos. Definiendo que el aceite quemado de motor igual afecta a la propiedad de porcentaje de vacíos de aire, tomando en cuenta que donde más se ve el efecto es el porcentaje del 5 % de aceite quemado de motor.

4.4.9. Análisis de precios unitarios

Tabla 4.4.20 Resultados de los precios unitarios de cada mezcla

Ítem	Unidad	Cantidad	Costo total (Bs.)
Mezcla asfáltica convencional en caliente	m ³	1	1454,89
Mezcla de asfáltica combinada con RAP en caliente	m ³	1	1292,84
Mezcla de asfáltica combinada con RAP en caliente más aceite quemado de motor	m ³	1	1272,87

Fuente: Elaboración propia

Comparando los precios de la mezcla convencional con la mezcla que contiene el RAP se tiene una diferencia de un 11,14 % más barata la mezcla con RAP.

En la comparación de la mezcla convencional con la mezcla con RAP y aceite quemado de motor se tiene una diferencia del 12,51 % más barata la mezcla con RAP y aceite quemado de motor.

Se puede apreciar que la diferencia de porcentajes de costos es muy bajos definiendo que reciclar en nuestro medio aun es un poco costoso o caro debido a que no se tiene la maquinaria adecuada para realizar la recolección y trituración del pavimento reciclado siendo muy costoso el adquirir el RAP y el aceite quemado de motor.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.1. Conclusiones

Se puede concluir que se pudo cumplir con el objetivo general que es “Evaluar las propiedades de resistencia de la combinación del aceite quemado de motor con una mezcla asfáltica nueva realizada con pavimento reciclado, de tal manera, se pueda definir qué efectos, mejoras y beneficios puede traer esta propuesta de reciclaje”.

Resaltar de igual forma que la hipótesis planteada de que “Si se aplica aceite quemado de motor en distintos porcentajes a una mezcla asfáltica en caliente que contiene pavimento reciclado, entonces se podrá mejorar sus propiedades de resistencia de la mezcla y ver su eficiencia como una nueva técnica de reciclaje”. No se cumple ya que el aceite quemado de motor no mejora todas las propiedades de resistencia, pero si causa efectos en la mezcla con RAP.

También se puede concluir que la estabilidad es afectada con el aceite quemado de motor hasta el porcentaje de 5 %, afectando en un 38,46 % ya que disminuye de 5192.15 lb a 3195,23 lb mostrando que el aceite actúa como un aditivo rejuvenecedor para esta propiedad. Para la propiedad de la fluencia el aceite también causa un efecto pero negativo ya que se parte de un valor de 7,45 pulgadas y no logra subir este valor para que este dentro del rango de 8-14 pulgadas. Y la propiedad de porcentaje de vacíos de aire igual se ve afectada por el aceite quemado de motor ya que a medida que se aumenta aceite bajan los porcentajes de vacíos de aire pero no logran cumplir estar dentro del rango de 3-5 %.

Es importante concluir el porcentaje óptimo de aceite quemado de motor es un 5% por que se tiene los mejores resultados y causa mayores efectos en las tres propiedades y para los porcentajes de 10 % y 15% de aceite quemado de motor se los descarta porque sus efectos son menores, esto se ve que son más afectados a causa de la falta de cemento asfáltico, que para la dosificación de los porcentajes de aceite quemado de motor se quita la misma cantidad de cemento asfáltico nuevo para añadir aceite.

Otra conclusión importante es resaltar que para el uso de un porcentaje de 40% de pavimento asfáltico reciclado en la dosificación de la mezcla se considera un valor muy alto definiendo que el aceite quemado de motor como aditivo rejuvenecedor para este porcentaje no causo muchos efectos de mejoras.

Un factor importante del diseño de mezclas con pavimento asfaltico reciclado que se realizo fue que la dosificación se la hizo para un peso de un 100% por este motivo al añadir los porcentajes de aceite se quitaba cemento asfaltico nuevo lo cual puede ser un factor que afecta a las propiedades.

También se puede concluir que en nuestro medio realizar mezclas con pavimento reciclado no es muy económico a falta de maquinaria especial en recolectar y preparar el RAP para un diseño de una mezcla. La recolección del aceite quemado de motor es un poco costosa ya que no se cuenta con centros que reciclen aceites según el tipo o marca, pero no deja de ser un buen aporte o una opción para ayudar al medio ambiente.

Los valores obtenidos de todos los ensayos de todos los materiales que se utilizaron dieron resultados que cumplen con lo que se especifica para el diseño Marshall.

Es importante concluir que trabajar con materiales reciclables es un campo muy extenso y poco experimentado ya que no se tiene nada estandarizado sobre los resultados que se pueden obtener.

5.1.2. Recomendaciones

Se recomienda en estudios posteriores probar la investigación con otros tipos de aceite ya sean más densos como el aceite 20-50 de motores a diésel o también con aceites de motores a gasolina para ver qué tipo de reacciones positivas o negativas se da en las propiedades de resistencia.

De igual forma es recomendable probar con otros tipos de materiales de aporte para buscar un mejor rendimiento en el diseño. O de igual forma se recomienda a la hora que se hace un diseño probar con un cemento asfáltico 60-70 para ver cómo reacciona en esa mezcla.

Se recomienda para posteriores diseños al usar otros aditivos de materiales reciclables y se haga una dosificación que no quite cemento asfáltico nuevo y se realice una dosificación mayor al peso de 100% para considerar partir de una mezcla óptima con RAP.

Dado que las especificaciones técnicas para construcción de carreteras del INVIAS permite usar RAP en cantidades como máximo 40 % (siempre y cuando cumplan con las características propias del proyecto), se propone realizar investigaciones que exploren el uso de mayores porcentajes de RAP o con menores porcentajes para la elaboración de mezclas asfálticas aptas para la construcción y/o mantenimiento de vías terciarias.

Es importante resaltar que el uso de RAP en mezclas asfálticas es una opción económica en especial, debido al ahorro de materiales (agregados vírgenes y asfalto), y en principio, al transporte de los mismos a la planta de producción, aun cuando es necesario considerar el transporte del RAP, sin contar con el beneficio ambiental por la eficiencia en el uso de los recursos naturales; sin embargo, es necesario realizar más investigaciones frente a este tema que permitan obtener más información y confiabilidad en el uso de este método y se pueda realizar su producción masiva en plantas asfálticas. Ya que en nuestro medio no es muy satisfactorio económicamente.

Este presente trabajo deja abierto varios campos de investigación donde se recomienda también hacer más estudios para tener más datos sobre las mezclas asfálticas realizadas con materiales reciclables. Ya que intervienen varios factores a la hora de hacer la mezcla como ser la temperatura de mezclado y el porcentaje óptimo que se debe usar como máximo o mínimo para la obtención de mejores resultados.