

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El reciclado de pavimentos constituye una alternativa de rehabilitación de firmes más competitiva y sostenible que la actuación convencional de refuerzo, ya que permite minimizar la utilización de recursos no renovables, áridos naturales y ligantes hidrocarbonados de origen petrolífero y previene la creación de residuos y la ocupación de botaderos, disminuyendo por consiguiente la necesidad de transportar estos materiales desde y hacia la obra. En este contexto, el reciclado, como medio de racionalizar los recursos, se convierte en una necesidad.

El reciclado es una técnica de rehabilitación de carreteras, que consiste en la reutilización de los materiales procedentes de las carpetas asfálticas del pavimento que ya ha estado en servicio y que han perdido propiedades como la cohesión, textura, composición, geometría, etc., pero tienen el potencial de ser reutilizados para conformar un pavimento nuevo, rejuveneciendo las mezclas y corrigiendo granulometrías.

Los primeros desarrollos de reciclaje se remontan a los años 70 en los Estados Unidos, Canadá y en Europa como Francia, Italia y Alemania, con un doble efecto de la evolución tecnológica de reciclado de pavimentos. Así también en los países de Sudamérica, tales como Brasil, Colombia, Venezuela, Chile, Perú Argentina, se tienen registros de reciclado de grandes volúmenes de carpetas asfálticas, empleando diversas técnicas de reciclado.

Lo que se pretende en este trabajo es realizar la técnica de reciclado en caliente en planta, de la carpeta asfáltica deteriorada de la avenida La Paz, que para mejorar sus condiciones resistentes, es necesario adicionar materiales nuevos, como son el betún y los agregados pétreos. El proceso consiste en retirar la carpeta asfáltica envejecida, para transportar al laboratorio, donde se caracterizará el material a reciclar y los materiales de aportación; con ello diseñar nuevas mezclas bituminosas con distintos porcentajes de betún adicional, para luego someterlo pruebas Marshall y a partir de ello, obtener el porcentaje óptimo de betún adicional, con condiciones de resistencia y economía.

De esta manera el reciclado de pavimentos toma protagonismo en la sociedad, como una enorme necesidad para racionalizar los recursos, reducir el uso de energía y proteger en medio ambiente.

1.2. ANTECEDENTES

El firme de una carretera ha de proporcionar una conducción cómoda y segura al usuario. Una vez que una infraestructura vial ha sido ejecutada comienza la fase de “explotación”. En esta fase se desarrollan dos tipos de actividades: unas dirigidas al servicio que presta la carretera y otras dirigidas al mantenimiento de la propia infraestructura. Mientras que las primeras están relacionadas con la vialidad, la información a los usuarios, y el uso de la carretera, las segundas, las labores de conservación, incluyen intervenciones físicas sobre la infraestructura cuyo objetivo es preservar el patrimonio vial y mantener las características iniciales del pavimento, ya que las mezclas bituminosas que conforman sus capas superiores se van deteriorando por la acción conjunta del tráfico y las condiciones climáticas.

Estas actuaciones de conservación se dividen a su vez en dos, por un lado las de pequeña entidad como son bacheos, sellado de grietas, fresados localizados..., y por otro, rehabilitaciones a las que se recurre cuando el grado de deterioro de la carretera es mayor y suponen intervenciones de mayor envergadura.

Las rehabilitaciones de un firme incluyen actuaciones de carácter extraordinario, a menudo de aplicación general en un tramo de longitud apreciable y cuyo objetivo es un aumento significativo del índice de estado o de comportamiento de un firme. Puede referirse a las características superficiales, tratándose entonces de rehabilitaciones o renovaciones superficiales del pavimento, o a las características estructurales.

Otra técnica de rehabilitación consiste en fresar una o varias capas del firme, para, a continuación, reponer el espesor eliminado. De esta manera el recrecimiento es menor y se evitan problemas de gálibo que en algunas ocasiones se pueden presentar. El fresado previo al recrecimiento tiene además la gran ventaja de poder rehabilitar de manera diferente zonas con distinto grado de deterioro, por ejemplo, los distintos carriles de una misma calzada de una autopista. El fresado de pavimentos genera un residuo que ha de ser trasladado a vertedero.

Una tercera técnica y que solventa los inconvenientes de las anteriores es el reciclado de firmes. Consiste en la reutilización de los materiales de las capas degradadas en la fabricación de nuevas mezclas bituminosas. Con esta práctica se elimina el problema del vertido del residuo generado al fresar los pavimentos. El tratamiento de los materiales reciclados se puede hacer en el mismo sitio en el que se encuentran, denominándose entonces, reciclados in situ, o transportándolos a una central, donde tras un proceso de estudio de tratamiento y clasificación, son introducidos en el ciclo de fabricación de una nueva mezcla.

En ambos casos, en función de la temperatura de trabajo los reciclados se pueden dividir en frío o en caliente.

Las técnicas de reciclado tuvieron un desarrollo tardío en España, pero en los últimos años su uso se ha acelerado. En la década de los 80 comenzaron a introducirse de forma tímida con reciclado en caliente sobre la propia carretera, pero la experiencia dio resultados buenos. Pero también en los primeros años 90, se inicia la aplicación de técnicas de reciclado en frío con emulsión y con cemento, y se ponen de manifiesto las ventajas de distinta índole que presenta una u otra técnica de rehabilitación.

El reciclado en planta en caliente ha presentado un significativo crecimiento en Canadá y muchas agencias y empresas se están especializando en esta industria para lograr mejores rendimientos, y no se descarta que en un futuro las mezclas recicladas sustituyan a las convencionales.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El estudio para la Obtención del Porcentaje Óptimo de Betún Adicional para el Reciclado de la Carpeta Asfáltica de la Avenida La Paz de la Ciudad de Tarija, se lo realizará con la finalidad de proyectar para el futuro, el empleo del reciclado de dicha carpeta asfáltica, para que las autoridades en los siguientes años, puedan emplear estas técnicas, mejor aún aplicar el presente trabajo de investigación, de tal manera, se pueda resguardar los recursos económicos, los recursos naturales, el medio ambiente, la seguridad y bienestar social.

Es así que el reciclado de los pavimentos asfálticos deteriorados no es una idea nueva, no obstante, con el aumento de las exigencias medioambientales y económicas, se ha convertido en una alternativa cada vez más utilizada por diferentes países del mundo.

El desarrollo de técnicas de reutilización de materiales procedentes del fresado de capas de firmes envejecidos, permite, desde el punto de vista Económico, reducir:

- La cantidad de asfalto empleado.
- La cantidad de áridos empleados.
- El transporte de materiales, con la consecuente disminución de costos directos e indirectos de su utilización.
- Pueden utilizarse los mismos asfaltos, las mismas plantas asfálticas y los mismos equipos de compactación que los utilizados para la elaboración de mezclas asfálticas convencionales, los costos finales de la carpeta reciclada

son mucho menores que los de las carpetas realizadas con material virgen, del orden del 50 %.

Desde el punto de vista Técnico queda demostrado que en los tramos en los que se ha utilizado estas técnicas, comprueban que las mezclas recicladas alcanzan un comportamiento superior al de las mezclas convencionales, siempre y cuando se tenga el suficiente cuidado en su diseño y proceso de fabricación.

Desde el punto de vista Ambiental, permite reducir:

- La cantidad de asfalto empleado.
- La cantidad de áridos empleados, evitando la innecesaria explotación de nuevas canteras.
- La cantidad de vertido de materiales de desperdicio.

1.4. DISEÑO TEÓRICO

1.4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.4.1.1. Situación Problemática

El pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y de la meteorología, estos dos factores, junto con el envejecimiento natural de los materiales, hacen que la carpeta asfáltica sufra un proceso progresivo de deterioro, lo cual conlleva a una disminución paulatina de los niveles de seguridad y confort del tráfico, que sobrepasan ciertos valores y hacen necesaria la conservación de las vías.

El presupuesto necesario para el mantenimiento, así como los problemas ambientales, justifican la búsqueda de nuevas técnicas que permitan reducir costos y protejan el medio ambiente.

En la actualidad se observa un claro deterioro de la carpeta asfáltica de la avenida La Paz de la ciudad de Tarija, además de una vida útil superior a 10 años, lo que conlleva a la necesidad de aplicar en nuestro medio, una técnica innovadora de conservación, como es el reciclado de pavimentos, con la finalidad de preservar el medio ambiente, proteger los recursos naturales y que requiera bajo costo para su ejecución.

1.4.1.2. Problema

¿Cómo obtener la carpeta asfáltica reciclada de la avenida La Paz, adicionando cierto porcentaje de betún en condiciones óptimas?

1.4.2. OBJETIVOS

1.4.2.1. Objetivo General

Determinar el porcentaje óptimo de betún adicional, de una mezcla bituminosa reciclada, con el fin de reutilizar la carpeta asfáltica deteriorada de la avenida La Paz, para prolongar su vida útil y proteger el medio ambiente.

1.4.2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar la carpeta asfáltica a reciclar y los materiales de aportación como son el betún y los agregados pétreos.
- Determinar la nueva distribución granulométrica, optimizando la carpeta asfáltica a reciclar.
- Elaborar briquetas de las nuevas mezclas bituminosas, con diferentes porcentajes de betún adicional.
- Determinar el porcentaje óptimo de betún adicional de la mezcla asfáltica reciclada según el Método Marshall.

1.4.3. HIPÓTESIS

Si se extrae la carpeta asfáltica deteriorada de la avenida La Paz, entonces se podrá reciclar, reutilizando los materiales de dicha carpeta asfáltica, adicionando cierto porcentaje de betún y agregados nuevos, de tal manera, se pueda obtener una nueva mezcla bituminosa resistente y económica, con la finalidad de reducir costos, prolongar la vida útil de la vía y proteger el medio ambiente.

1.4.4. DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES

1.4.4.1. Variable Independiente

- Porcentaje de betún adicional.

1.4.4.2. Variable Dependiente

- Resistencia técnica.

1.4.4.3. Conceptualización y Operacionalización de Variables

Tabla 1.1: Conceptualización y Operacionalización de Variables

Variable Nominal	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor Acción
<p>VARIABLE INDEPENDIENTE</p> <p>Cantidad de betún adicional para carpeta asfáltica reciclada.</p>	<p>Se refiere a los distintos porcentajes de betún, que se adiciona a los agregados de una carpeta asfáltica reciclada.</p>	<p>Betún Asfáltico nuevo de aportación</p>	<p>Caracterización</p>	Penetración
				Viscosidad
				Punto de Ignición
				Ductilidad
				Peso Específico
		<p>Carpeta Asfáltica a Reciclar</p>	<p>Caracterización de los Agregados a reciclar</p>	Granulometría
				Peso Específico
		<p>Agregado nuevo de aportación</p>	<p>Caracterización</p>	Penetración
				Viscosidad
				Granulometría
Peso Específico				
<p>Diseño de una nueva Mezcla Bituminosa</p>	<p>% de Betún Adicional (sólo con carpeta asfáltica a reciclar)</p>	<p>Elaboración de briquetas</p>		
			<p>% de Betún adicional (con agregado nuevo de aportación)</p>	
<p>VARIABLE DEPENDIENTE</p> <p>Resistencia técnica de una carpeta asfáltica reciclada.</p>	<p>Se refiere a los parámetros, que caracterizan a la resistencia de una carpeta asfáltica reciclada.</p>	<p>Mezcla Bituminosa Reciclada</p>	<p>% de Betún Adicional (sólo con carpeta asfáltica a reciclar)</p>	<p>Ensayos Método Marshall</p>
			<p>% de Betún adicional (con agregado nuevo de aportación)</p>	

Fuente: Elaboración Propia

1.5. DISEÑO METODOLÓGICO

1.5.1. COMPONENTES

1.5.1.1. Unidades de Estudio y Decisión Muestral

1.5.1.1.1. Unidad de Estudio

- Carpeta Asfáltica Reciclada con Betún Adicional.

1.5.1.1.2. Población

- Técnicas de Reciclaje de Carpetas Asfálticas.



1.5.1.1.3. Muestra

- Reciclado de Carpeta Asfáltica en Planta en Caliente con Betún Adicional.

1.5.1.1.4. Muestreo

- Se realizará el muestreo de la carpeta asfáltica deteriorada de la avenida La Paz, tomando las muestras por el método de demolición mecánica de manera que sea representativo para el presente estudio.
- Se obtendrán muestras de tres puntos diferentes, cada 200 metros de longitud, a 2 metros de distancia de uno de los extremos del ancho de la calzada.
- En cada punto de muestreo, se obtendrán un total de 30 a 40 Kg.

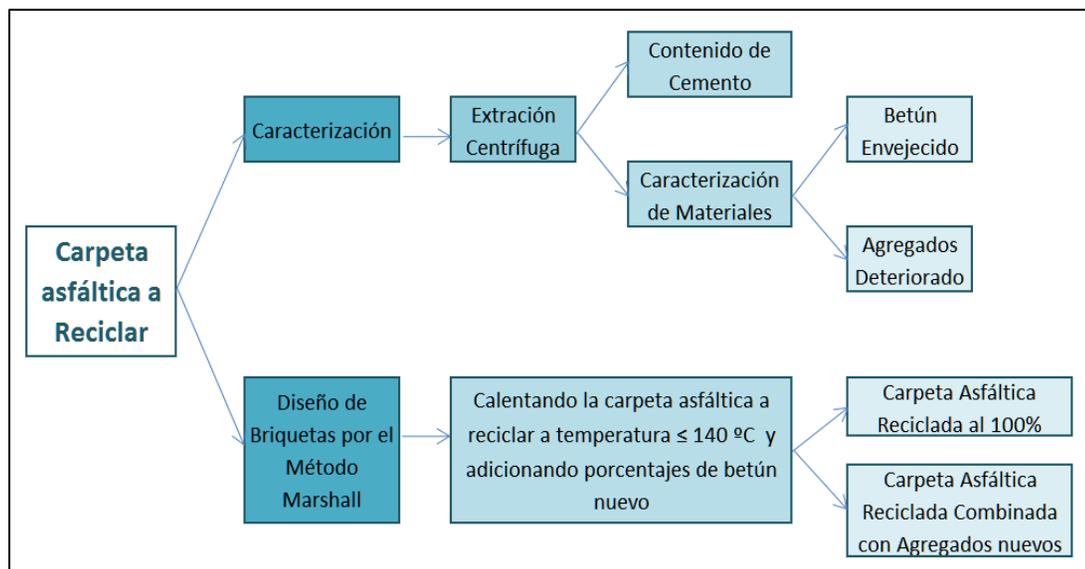
1.5.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS

1.5.2.1. Selección de Métodos y Técnicas

El método que se realizará para la obtención del porcentaje óptimo de betún adicional para la carpeta asfáltica reciclada de la avenida La Paz, es el método de Reciclado en Planta en Caliente, que consiste en llevar el material a reciclar al laboratorio, donde se lo caracterizará sometiéndolo al extractor centrífugo para obtener por separado los agregados y el betún envejecido, y conocer el contenido de asfalto inicial de la mezcla asfáltica.

A su vez, se caracterizarán los materiales nuevos de aportación, como son los agregados y el betún nuevos. Se procede a diseñar dos nuevas mezclas bituminosas a partir de un análisis granulométrico, el primero manteniendo la carpeta asfáltica en la misma condición que se extrajo y la segunda mejorando su granulometría de forma constante, en ambos casos haciendo variar los porcentajes de betún adicional.

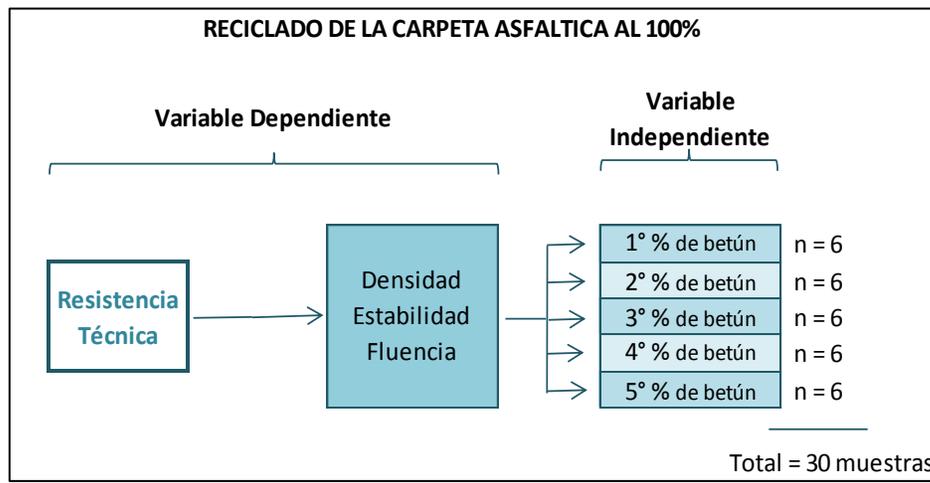
Esquema 1.1: Análisis de caracterización y empleo de la carpeta asfáltica a reciclar



Fuente: Elaboración Propia

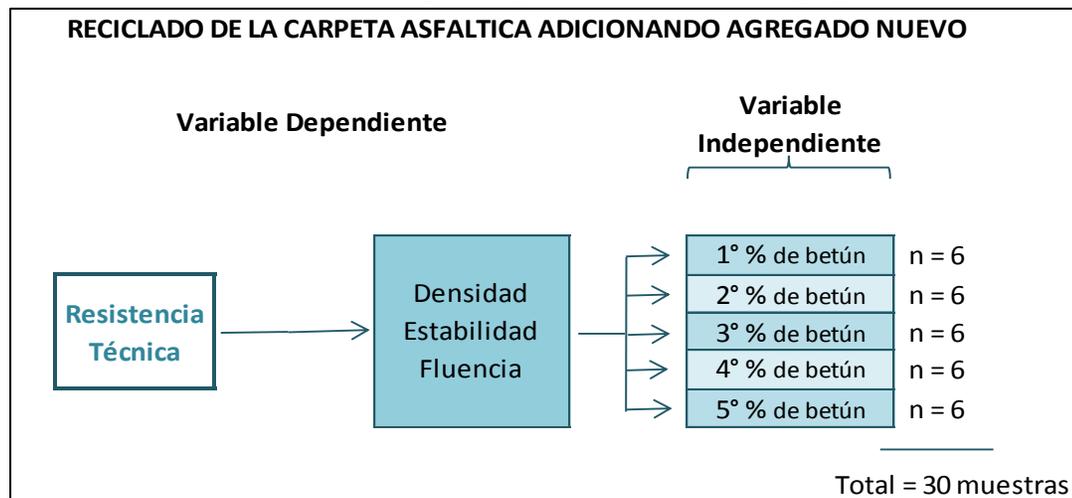
Para ello es necesario determinar la cantidad de ensayos que se deben realizar, como se propone en las siguientes gráficas.

Esquema 1.2: Obtención de muestras para ensayos de Resistencia Técnica para el reciclado del 100% de la carpeta asfáltica.



Fuente: Elaboración Propia

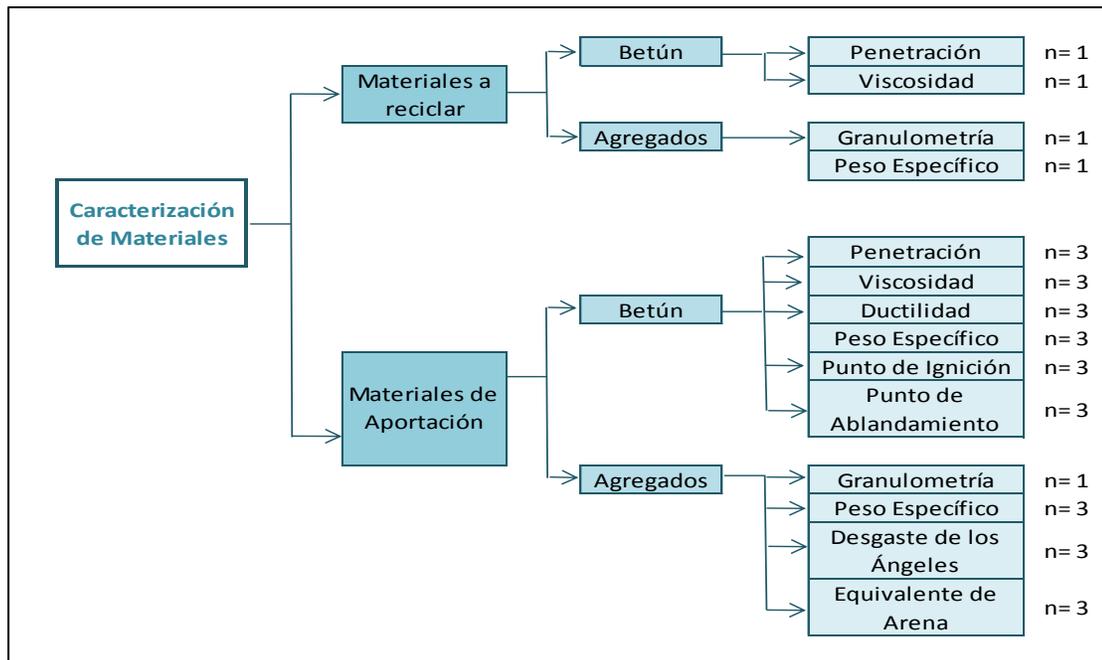
Esquema 1.3: Obtención de muestras para ensayos de Resistencia Técnica para el reciclado de la carpeta asfáltica adicionando agregado nuevo.



Fuente: Elaboración Propia

Según el esquema anterior se denota que se obtendrán un total de 60 briquetas para someterlas a las pruebas de resistencia técnica como se ve en el esquema superior. Para la caracterización de los materiales se prevé las siguientes cantidades de ensayos:

Esquema 1.4: Cantidad de ensayos para la caracterización de materiales.



Fuente: Elaboración Propia

1.5.2.2. Técnicas de Muestreo

1.5.2.2.1. Técnica de muestreo No Probabilística

El muestreo no probabilístico se aplica para la obtención de la carpeta asfáltica a reciclar y de los materiales de aportación, como son los agregados y el betún, ya que estos materiales son seleccionados intencionalmente. Los agregados nuevos de aportación se obtendrán del acopio de la planta de asfaltos de la Alcaldía Municipal de la Ciudad de Tarija, ubicada en la comunidad de La Pintada, que éste a su vez tiene como banco a la chancadora de San Mateo.

El betún tiene procedencia del país de Brasil y será proporcionado por la Alcaldía Municipal de la Provincia Cercado del Departamento de Tarija.

1.5.2.3. Descripción de Equipos e Instrumentos

A. Para la separación del material a reciclar

a. Horno Eléctrico.- El horno eléctrico es utilizado para calentar los núcleos extraídos para luego someterlos al extractor centrífugo, y debe contar con una temperatura constante de 100 a 140 °C.

b. Extractor centrífugo de asfalto.- Con el extractor centrífugo sirve para separar el ligante asfáltico de los agregados, haciendo uso de gasolina.

B. Para la caracterización de los agregados

Tanto para los agregados a reciclar como para los agregados de aportación:

a. 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.

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

c. Juego de Tamices.- El juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11, lo cual contiene los tamices 1”, ¾”, ½”, 3/8”, No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100, No. 200, tapa y fondo.

C. Para la caracterización del betún

Tanto para el betún a reciclar como para el betún de aportación:

a. Penetrómetro de Asfalto.- Que sirve para determinar la penetración del betún en estudio.

b. Viscosímetro del Asphalt Institute de brazos cruzados.- Con los cuales se determina la viscosidad cinemática del betún en estudio.

c. 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.

d. Ductilímetro.- Con el cual se determina la ductilidad del betún, a una temperatura estándar de 25 °C.

e. Peso Específico.- Que sirve para determinar la densidad del cemento asfáltico.

f. Aparato para determinar el Punto de Ablandamiento.- Con el cual se determina la temperatura a la cual el betún se ablanda y pierde propiedades de plasticidad.

D. Para la dosificación y diseño de briquetas

a. Moldes de compactación para asfaltos.- En estos moldes se vaciará la mezcla bituminosa reciclada, creando briquetas con distintos porcentajes de betún.

b. Compactador para moldes para asfaltos.- Este compactador sirve para compactar las briquetas según especificaciones técnicas.

E. Para los ensayos de resistencia técnica

- a. Marco de carga multiplex Marshall.- Este marco sirve para disponer en él los distintos cabezales, según las pruebas que se requiera.
- b. Cabezal de Rotura Marshall.- Este cabezal junto con el marco multiplex, permite realizarlos ensayos de estabilidad y fluencia para las briquetas en análisis.

1.5.2.4. Procedimiento de Aplicación

a. Extracción de las muestras a reciclar

Se procede a visitar el lugar para realizar una previa inspección y ubicar los puntos de donde se obtendrán las muestras.

Una vez determinado los puntos exactos de donde se van a extraer las muestras, se hace uso de la pala y picota para sacar las muestras en bloques o trozos. Después de obtener todas muestras, las mismas serán llevadas al laboratorio de asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

b. Separación del material a reciclar

Una vez obtenido todas las muestras de carpeta asfáltica a reciclar, se procede a introducirlas en el horno para fluidificarlas y luego introducir dicha mezcla al extractor centrífugo, haciendo uso de la gasolina como agente separador, de donde se obtendrán los agregados y el ligante por separado. Cabe resaltar que la capacidad del extractor centrífugo oscila entre uno a dos kilogramos de muestra.

c. Caracterización de los agregados

Para caracterizar los agregados ya sea a reciclar o de aporte, se deben someter al horno el secado y luego someterlo a la serie de tamices, con trillado constante en el RopTap por unos quince minutos aproximadamente, luego de este tiempo proceder al pesaje del material que contiene cada tamiz.

Con estos valores obtener las curvas granulométricas tanto para los agregados a reciclar como para los agregados de aporte.

Analizar ambas curvas granulométricas y compensar los porcentajes, de tal manera que se obtenga una nueva curva granulométrica, optimizando el agregado a reciclar. Esta nueva curva granulométrica debe cumplir con las normas que proporcionan rangos máximos y mínimos para cada tamiz.

d. Caracterización del betún

En este proyecto la caracterización del betún a reciclar como del betún de aporte, se basa en la determinación de la Viscosidad, Penetración y Punto de Inflamación, ya que se considera que son los tres parámetros más importantes para el presente estudio. Estos parámetros deben cumplir con los rangos especificados por normas, caso contrario no sería viable para realizar mezclas asfálticas y se buscaría otra procedencia del betún.

e. Dosificación y diseño de briquetas

Para la dosificación de las briquetas, se debe considerar que la granulometría del agregado será constante, como se determinó anteriormente. A este agregado se le incluirá el ligante, que consta de verter todo el betún envejecido e incluir el betún de aporte, siendo éste último variable en su porcentaje. De tal manera se obtendrán briquetas con cinco porcentajes de betún adicional, para luego someterlos a las pruebas de resistencia técnica.

Es necesario resaltar que para el diseño de las briquetas se seguirá el Método Marshall.

f. Ensayos de resistencia técnica

Para los ensayos de resistencia técnica, se deben tener listas las briquetas, con su respectiva enumeración, para luego someterlas a las pruebas de Densidad, Estabilidad y Fluencia según el Método Marshall.

1.5.2.5. Preparación Previa

Dentro de la preparación previa a los ensayos, es necesario contar con tablas que permitan la tabulación de datos, donde especifique el lugar de obtención, el tipo de muestra, el ensayo a realizar, la numeración respectiva y los datos que se van a necesitar para cada tipo de ensayo.

Junto con lo anterior debe ir un cronograma de actividades para que permita el fácil desarrollo de las actividades o acciones a realizar.

1.5.3. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS Y LA INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Una vez obtenidos los resultados de la caracterización y de las pruebas de resistencia técnica, se procede al tabulado y si es necesario corregir los resultados obtenidos de cada ensayo.

Con los ensayos de caracterización determinamos el cumplimiento de requisitos mínimos según normas, que deben tener tanto del ligante que es el betún y de los agregados.

Con los ensayos de pruebas de resistencia técnica determinamos las siguientes curvas:

- 1) % de Betún Adicional vs. Densidad
- 2) % de Betún Adicional vs. Estabilidad
- 3) % de Betún Adicional vs. Fluencia
- 4) % de Betún Adicional vs. % de Vacíos de la Mezcla
- 5) % de Betún Adicional vs. Relación Betún Vacíos
- 6) % de Betún Adicional vs. Vacíos de Agregado Mineral

De cada curva se selecciona el valor del porcentaje de betún más adecuado con previo análisis. El valor más aproximado del porcentaje óptimo de betún adicional para la mezcla, es el promedio de los valores seleccionados. Con este porcentaje promedio aproximado, finalmente se define el porcentaje óptimo de betún adicional, tomando en cuenta que a mayor resistencia, mayor porcentaje de betún adicional, sin embargo como se trata de optimizar los recursos, se debe elegir un valor donde la resistencia sea tolerable, es decir, mayor a la resistencia mínima de una mezcla convencional.

1.6. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

En resumen el alcance que tendrá este trabajo es la Obtención del Porcentaje Óptimo de Betún Adicional para el Reciclado de la Carpeta Asfáltica de la Avenida La Paz de la Ciudad de Tarija”

En el primer capítulo, se describe de manera general de que trata la investigación para el contenido óptimo de betún adicional, la situación problemática, los objetivos, la justificación y el alcance del presente proyecto.

El segundo capítulo, comprende la parte teórica, donde se detalla el estado de conocimiento, es decir, toda la información necesaria y relevante al proyecto, como es todo lo referente al reciclaje y los agregados a utilizar, diseño de carpetas asfálticas según el método Marshall, normas, etc.

El tercer capítulo, describe los medios y criterios para obtener los datos de caracterización tanto del material a reciclar como de los materiales nuevos de aportación, que luego son procesados y analizados según normas. También se aplica

el diseño de briquetas con el método Marshall, en planta en caliente, con dos tipos de análisis, el primero con un reciclado al cien por ciento y el segundo con un reciclado mejorando la curva granulométrica del agregado de la carpeta asfáltica a reciclar; para ambos casos se trabaja con cinco porcentajes en análisis, que con dichos resultados se logra obtener el porcentaje óptimo de Betún Adicional.

El cuarto capítulo, comprende todo el diseño de briquetas a partir de un análisis final de datos, también establece la forma de determinar el porcentaje óptimo de betún, según curvas de correlación de la variable independiente que es el porcentaje de betún adicional, con la variable dependiente que es la resistencia técnica. Para luego con estos resultados realizar una propuesta final del proyecto.

El quinto capítulo, establece las conclusiones a partir de lo planteado en los objetivos del presente proyecto y las recomendaciones para la correcta aplicación y ejecución de este trabajo.

CAPÍTULO II

RECICLAJE DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Los volúmenes de pavimento flexible tan considerables hacen plantarse seriamente la posibilidad del reciclado de los materiales extraídos de los firmes para su reutilización disminuyendo así la cantidad de áridos y betún de nueva aportación y a su vez reducir el impacto ecológico que generan tales residuos. Sin embargo, el reciclado como técnica de rehabilitación de carreteras no se empieza a utilizar hasta inicios de los años setenta, debido a la crisis del petróleo y consecuentemente, a un aumento del precio del betún. Es entonces cuando esta técnica crece significativamente en Estados Unidos, donde se pasa 50.000 toneladas recicladas en 1975 a 25.000.000 de toneladas recicladas en 1980.

Actualmente el reciclado en caliente es una técnica convencional en la que países como Bélgica, Dinamarca, Nueva Zelanda o Japón llevan el liderazgo.

El reciclado en planta en caliente ha presentado un significativo crecimiento en Canadá y muchas agencias y empresas se están especializando en esta industria para lograr mejores rendimientos, y no se descarta que en un futuro las mezclas recicladas sustituyan a las convencionales.

Las técnicas de reciclado de mezclas en caliente desarrolladas en Estados Unidos a comienzos de los años 70, llegaron a Europa a finales de la década y hay numerosos países europeos, especialmente Alemania, Austria, Holanda y Dinamarca, que las han utilizado con regularidad logrando mezclas recicladas con un comportamiento equivalente al de las mezclas convencionales fabricadas en caliente, basando el diseño de los firmes fabricados con mezclas recicladas en el método Marshall.

2.2. DEFINICIÓN DE RECICLAJE DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Se entiende por reciclaje a la reutilización, generalmente luego de cierto tratamiento, de un material de pavimento que ha cumplido su finalidad inicial, el cual puede emplearse para construir un refuerzo en la misma carretera o alguna capa de una calzada nueva.

Entre los factores fundamentales de han contribuido al desarrollo de estas técnicas merecen destacarse las siguientes:

- a) La crisis energética causante de los significativos aumentos en los precios de los productos derivados del petróleo.
- b) El progresivo agotamiento de las fuentes de obtención de los agregados pétreos de adecuada calidad y el incremento de sus precios en canteras.
A estos aspectos debe adicionarse la influencia notable de los costos del transporte cuando los agregados pétreos de calidad se encuentran a considerable distancia de las obras. Factor considerado de significativo peso en los análisis de precios de las obras.
- c) Los aspectos ecológicos y la necesidad de conservar el medio ambiente, son factores que les otorgan actualmente la debida atención de los países más desarrollados, razones por las cuales es notoria la tendencia hacia la reutilización de los materiales existentes en lugar de procedes a la explotación de yacimientos y canteras, contaminando la zona donde se realizan estas actividades.
- d) La crítica disponibilidad de los recursos económicos destinados a proyectos nuevos o su influencia para hacer frente a la continua y efectiva conservación, rehabilitación y reconstrucción de los sistemas viables existentes, ha obligado a estudiar y aplicar técnicas de mantenimientos menos onerosos pero con un comportamiento similar a las actuaciones convencionales.

2.3. CAMPOS DE APLICACIÓN DEL RECICLAJE

El reciclado de pavimentos puede emplearse en aquellos casos en que las fallas pueden atribuirse a:

- a) Elevada rigidez del ligante asfáltico, como consecuencia de su envejecimiento por acción del tiempo.
- b) Desprendimiento de los agregados ocasionado por una falla de adherencia con el asfalto o bien por el envejecimiento del mismo.
- c) Deformaciones plásticas que producen ahuellamiento, ondulaciones, corrimientos, etc. Esto es atribuible, principalmente, a mezclas con baja estabilidad.
- d) Pulimiento de los agregados superficiales que disminuye la resistencia al deslizamiento de la capa de rodamiento.

- e) Afloramiento de asfalto, como consecuencia de una falla en el diseño de la mezcla, que conduce también a superficies propensas al patinaje de los vehículos.
- f) Fisuras y grietas ocasionadas por fatiga de la carpeta asfáltica (piel de cocodrilo) o bien por contracción producida por efectos térmicos (fisuramiento transversal).
- g)

2.4. FUNDAMENTOS DE LA TÉCNICA DE RECICLAJE

La conservación de carreteras es el primer campo de aplicación de las técnicas de reciclado de firmes. La técnica de reciclado nos permite reutilizar el material extraído del firme basándonos en los siguientes puntos:

- El final de la vida útil de las capas bituminosas de los firmes de carreteras suele producirse como consecuencia de agrietamientos, deformaciones y/o pérdidas de capacidad estructural inadmisibles, no relacionados con los componentes de las mezclas, individualmente considerados.
- Los materiales contribuyentes de las mezclas bituminosas mantienen prácticamente intactas las propiedades por las que fueron seleccionados mucho tiempo después de su puesta en obra. El único factor que tendríamos que tener en cuenta es el envejecimiento de su ligante, causado básicamente por las operaciones de fabricación, transporte y puesta en obra.
- El betún incorporado en la central y el envejecimiento procedente de los materiales reciclados, se combinan perfectamente, de modo que el auténtico ligante de la mezcla final es el obtenido por combinación de los dos betunes.

La calidad del reciclado de pavimentos asfálticos 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.

2.5. FORMAS DE OBTENCIÓN DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO A RECICLAR (RAP)

El proceso comienza con la recuperación de los materiales de firmes para su posterior reciclado. 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 post-proceso a seguir para un óptimo aprovechamiento posterior en los procesos de reciclado en planta.

2.5.1. DEMOLICIÓN MECÁNICA

Las capas de firme se remueven 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, será necesario un tratamiento posterior de machaqueo con la finalidad de obtener una granulometría adecuada.

2.5.2. FRESADO

El fresado es una técnica necesaria cuando se ha de retirar 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, hará falta un post-proceso de machaqueo o de clasificación previo al de reciclado al igual que en la demolición mecánica.

2.6. DEFINICIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, 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 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.

2.6.1. Clasificación de las Mezclas Asfálticas por la Temperatura de puesta en obra

- Mezclas asfálticas en Frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.
- Mezclas asfálticas en Caliente: Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

2.7. TIPOS DE RECICLADO

2.7.1. Reciclaje superficial

Consiste en el tratamiento de la superficie del pavimento en bajos espesores, generalmente no superiores a los 2.5 centímetros, en casos en que los deterioros del pavimento no sean atribuibles a deficiencias estructurales. Se incluye todo procedimiento en que la superficie es fresada, cepillada o escarificada, triturada y adicionada o no de un agente de reciclaje, con o sin la incorporación de pequeños porcentajes de materiales vírgenes, reacondicionada y recompactada. El proceso puede adelantarse en caliente o en frío y en este último caso el agente de reciclaje, si se requiere, se aplica en forma de emulsión.

2.7.2. Reciclaje en el lugar (in-situ)

Conocido también como reciclaje en frío, consiste en rehabilitar el pavimento asfáltico hasta una profundidad mayor de 2.5 centímetros, involucrando o no el material de la capa de base. Para el espesor es escarificado y el material trozado resultante es triturado hasta un tamaño adecuado y luego, mezclado con agente reciclaje y eventualmente con cierto porcentaje de agregado nuevo, todo como para cumplir con las exigencias de la nueva mezcla. Como su nombre lo indica, el proceso se realiza generalmente en frío y los aditivos más utilizados son emulsiones asfálticas, cemento Portland, cal, mezclas de cal y cenizas volantes. También es posible el reciclaje in-situ con cemento asfáltico de alto grado de penetración.

2.7.3. Reciclaje en planta

Denominado también reciclaje en caliente, consiste en escarificar el espesor deseado del pavimento existente y transportar el material trozado a una planta en la que es triturado y clasificado por su granulometría, el material también puede obtenerse del pavimento por medio del fresado en frío. Posteriormente, en base al análisis de composición del material viejo, se reconstruye en caliente la nueva mezcla a reciclar, la cual debe responder al diseño adoptado. Para ello, se agregan materiales nuevos que comúnmente incluyen un agente de reciclaje y agregado pétreo virgen, así como asfalto nuevo. La nueva mezcla en caliente se lleva al sitio de origen o al que se haya elegido para su colocación, donde se distribuye y compara mediante métodos y equipos convencionales.

En todos los casos, la estructura resultante del trabajo de reciclaje, respondiendo al proyecto correspondiente, podrá emplearse como capa de rodadura o base, caso este último en el cual se deberá superponer una nueva capa superficial.

2.8. VENTAJAS DE LAS TÉCNICAS DE RECICLADO

En la Tabla 2.1 se muestra las principales ventajas de las distintas técnicas de reciclado más frecuentemente utilizadas.

Tabla 2.1: Principales ventajas de las técnicas de reciclado

Técnicas de reciclado	Ventajas
Reciclado Superficial	<ul style="list-style-type: none"> – Mejora la resistencia al deslizamiento. – Corrige las deficiencias de origen superficial. – Mejora el perfil geométrico de la calzada. – Permite eliminar la capa de restitución de gálibo en refuerzos del pavimento.
Reciclado “In Situ”	<ul style="list-style-type: none"> – Mejora la resistencia al deslizamiento. – Corrige las deficiencias de origen superficial y estructural. – Permite incrementar en forma limitada la resistencia estructural del pavimento. – Elimina temporalmente las fisuras reflejas. – Permite corregir las características de las mezclas asfálticas superficiales (6-7cm) con deformaciones plásticas. – Mejora el perfil geométrico de la calzada.
Reciclado en Planta	<ul style="list-style-type: none"> – Refuerza estructuralmente al pavimento de acuerdo con las necesidades del proyecto. – Corrige las deficiencias de origen superficial y estructural. – Produce mezclas asfálticas de mejor calidad. – Permite eliminar o corregir las capas intermedias de deficiente comportamiento. – Elimina las fisuras reflejadas. – Mejora la resistencia al deslizamiento. – Corrige el perfil geométrico de la calzada.

Fuente: *The Asphalt Institute “Asphalt Cold – mix Recycling”, MS, March 1983.*

2.9. RECICLADO DE FIRMES

El reciclado es una técnica de rehabilitación que consiste en la reutilización de los materiales procedentes de los firmes que han estado en servicio: materiales deteriorados que han perdido en gran parte sus propiedades iniciales o materiales aún en condiciones de servir cuyas características se desea mejorar. Es una técnica relativamente antigua que en los últimos años ha experimentado un fuerte impulso. El reciclado de los pavimentos asfálticos presenta una respuesta adecuada al reto que representan la creciente escasez de áridos y la dificultad cada vez mayor de

enviar a un vertedero unos residuos que se pueden reutilizar. Al reciclar las capas bituminosas se aprovecha el ligante que contienen y se logra disminuir el consumo de betún. Se reducen también los volúmenes de vertido, que en algunos países es una práctica casi imposible, debido a la falta de espacio y a las fuertes regulaciones relacionadas con el medioambiente. Estas ventajas han hecho que el reciclado se haya convertido en una alternativa de gran interés, cada vez más utilizada, en conservación y rehabilitación de firmes de carreteras.

Las distintas técnicas de reciclado se clasifican en diferentes categorías en función de la temperatura de trabajo y de la ubicación donde se realice. De esta manera se pueden distinguir los siguientes tipos de reciclados que se describen a continuación:

- Reciclado en planta en caliente
- Reciclado in situ en caliente
- Reciclado en planta en frío
- Reciclado in situ en frío:
 - . Reciclado in situ en frío con cemento
 - . Reciclado in situ en frío con emulsión

2.9.1. RECICLADO EN PLANTA EN CALIENTE

Se entiende por “Reciclado de Pavimentos Asfálticos en Caliente en Planta” al proceso mediante el cual los materiales recuperados de capas bituminosas de firmes deteriorados o de mezclas nuevas que no han sido utilizadas por ser un excedente o por no haber cumplido con las especificaciones de proyecto, son mezclados con árido virgen, betún nuevo y/o agentes rejuvenecedores, en las proporciones adecuadas, para producir nuevas mezclas en caliente que cumplan con los requerimientos de calidad, resistencia y durabilidad exigidos para el tipo de capa en que serán utilizados.

El proceso de reciclado de pavimentos asfálticos en planta en caliente consiste básicamente, en retirar las capas bituminosas de los firmes envejecidos mediante el fresado o demolición, para transportar dicho material a una central de fabricación en la que es acopiado, caracterizado y eventualmente procesado, hasta cumplir con ciertas condiciones de tamaño, humedad etc. A continuación es mezclado en caliente con áridos vírgenes, betún nuevo y/o agente rejuvenecedor, para obtener una mezcla bituminosa compuesta en parte por material reciclado

que es colocada y compactada en obra como si se tratara de una mezcla convencional.

De acuerdo con la "Asphalt Recycling Guide" de Austroads (1997), se puede decir que, en general, el 100% de los materiales recuperados de pavimentos deteriorados son susceptibles de ser reciclados, ya sea en la misma obra en la que son generados, en otro pavimento (práctica más habitual) o con propósitos diferentes a la fabricación de firmes.

El material recuperado de pavimentos asfálticos conocido como RAP, por su terminología en inglés "Reclaimed Asphalt Pavement", es el elemento más importante en esta técnica, ya que tiene una gran influencia sobre las características del producto final. Se trata de un material con un elevado potencial de reutilización que termina en vertedero si no se procede a su reciclado. La primera consideración a la hora de realizar la fórmula de trabajo de una mezcla reciclada es estudiar los materiales básicos de dicha mezcla, empezando precisamente por el RAP que es el más importante. Aunque existen numerosos métodos de ensayo para la formulación de mezclas recicladas, en la mayoría de los países se utiliza el método Marshall. Una vez obtenidas las propiedades de los materiales constitutivos, se puede formular la mezcla que responda a las exigencias requeridas.

Para asegurar una buena consecución de la fórmula de trabajo, es conveniente vigilar los procesos de ejecución de los ensayos para evitar, en especial el calentamiento de los áridos reciclados o la duración de la amasada.

En el proceso de fabricación hay que ajustar las características del ligante viejo del RAP, y mezclarlo con la cantidad correcta de un nuevo ligante de propiedades adecuadas. Este nuevo ligante ayudará a recuperar las características perdidas del betún envejecido contenido en el material fresado y permitirá cumplir con el contenido de ligante exigido para el tipo de capa del que se trate. Este proceso es viable gracias a que en el proceso productivo, en diversas formas según la técnica de reciclado en caliente empleada, la mezcla antigua se debe calentar hasta que el ligante antiguo adquiera una consistencia suficientemente baja para poder disgregar totalmente la mezcla antigua. En estas condiciones, y asumiendo un sistema y un tiempo de mezclado de los diversos componentes suficientemente eficaz, debe ser posible obtener una mezcla íntima entre el ligante antiguo y el de aportación de forma que se obtenga un ligante final homogéneo.

La cantidad y tipo de ligante nuevo a utilizar se determinará a partir del análisis del contenido y características del betún aportado por el RAP. Los betunes de penetración convencionales son los más usados en la fabricación de mezclas recicladas en planta en caliente y deberán cumplir con los mismos requerimientos de calidad que se exigen para las mezclas convencionales.

Si el contenido de RAP en la nueva mezcla es muy elevado o si el ligante contenido en el RAP tiene una penetración muy baja, se suele aplicar un agente rejuvenecedor que nos ayude a lograr la penetración adecuada restaure las características químicas óptimas de durabilidad del betún del RAP.

Los reciclados en planta en caliente se pueden fabricar en plantas de mezclas asfálticas convencionales adaptadas. En función del ajuste e intervención que se realice en la planta se pueden introducir porcentajes de RAP que varían desde un 10% en los casos más básicos hasta un 80% cuando se utilizan técnicas más sofisticadas para modificar las plantas y se realiza una mayor inversión. En estos casos, con altas tasas de reciclado, algunos autores han analizado el comportamiento de estas mezclas obteniendo buenos resultados con porcentajes de RAP de hasta 60%.

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

- a) 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.
- b) 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.
- c) 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.

- d) 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.

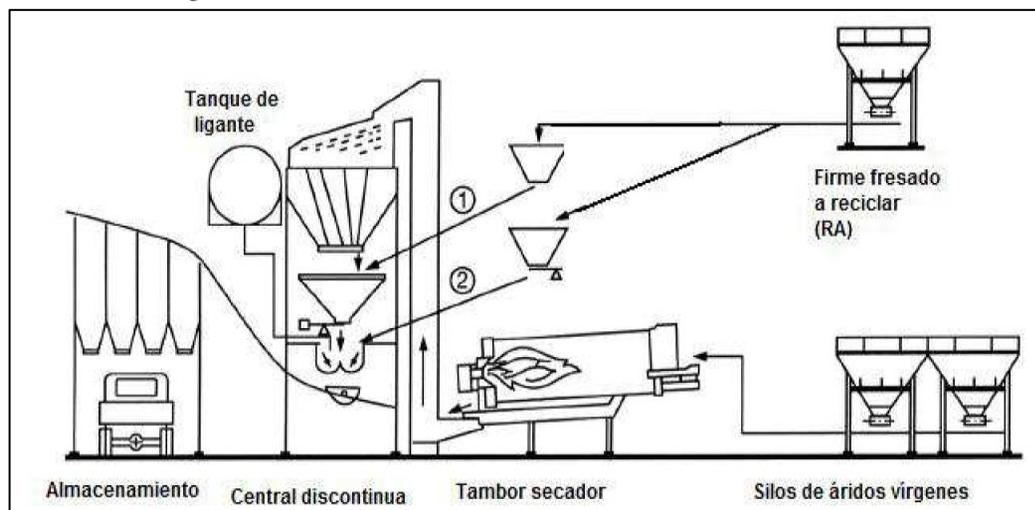
Se presenta a continuación los posibles tipos de plantas en las que se puede fabricar mezclas recicladas en caliente:

a) **Central discontinua sin tambor secador independiente (adición en frío)**

Los áridos RAP son añadidos directamente, en la unidad de pesado, a los áridos vírgenes sobrecalentados (hasta los 275° C), en lugar de ser calentados también en el secador. Debido a ello, se forma una gran cantidad de vapor que debe ser evacuado por el sistema de extracción de polvo y la chimenea central. En estos casos, la temperatura máxima se limita con el fin de impedir que se dañe alguna parte de la central.

Normalmente, mediante el uso de este tipo de central, se pueden llegar a incorporar en las mezclas recicladas un porcentaje de un 15% o como máximo 20% de RAP, según el contenido de humedad.

Figura 2.1. Central discontinua sin calentamiento de RAP

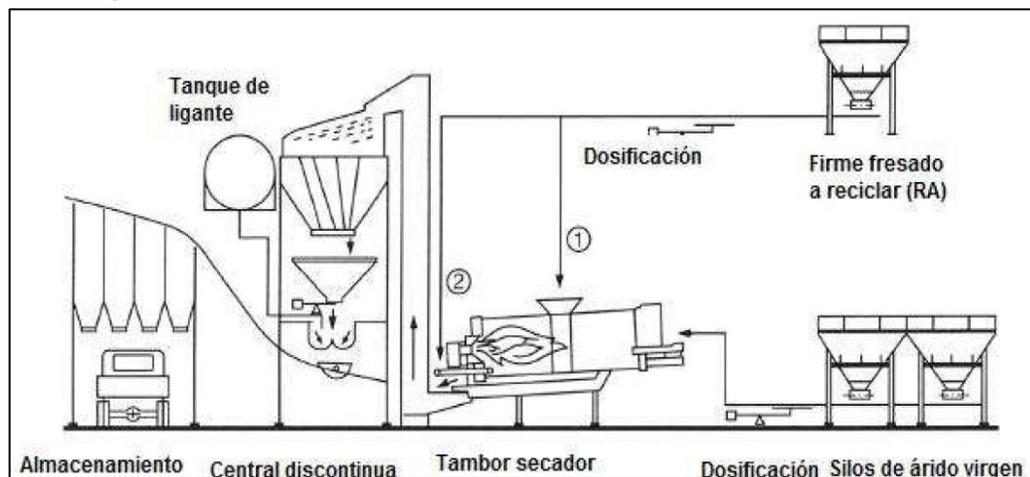


Fuente: Comité Technique AIPCR C7/8 – “Recyclage des Chaussées”

b) Centrales discontinuas sin tambor secador independiente (calentamiento simultáneo)

El RAP se calienta de forma simultánea que el árido nuevo en un solo tambor secador, provisto de un sistema especial para las adiciones. El RAP es añadido, bien a la mitad del tambor secador, o bien en el extremo donde se encuentra la llama calorífica (flujo inverso). Si el RAP se introduce en el extremo de la llama, el material se mezcla con el árido virgen cerca del final del secador, de manera que el tiempo para el calentamiento es bastante breve. Aplicando el sistema de flujo inverso es posible introducir en las mezclas recicladas niveles del 40% de áridos fresados reutilizados.

Figura 2.2. Central discontinua con calentamiento simultáneo de RAP



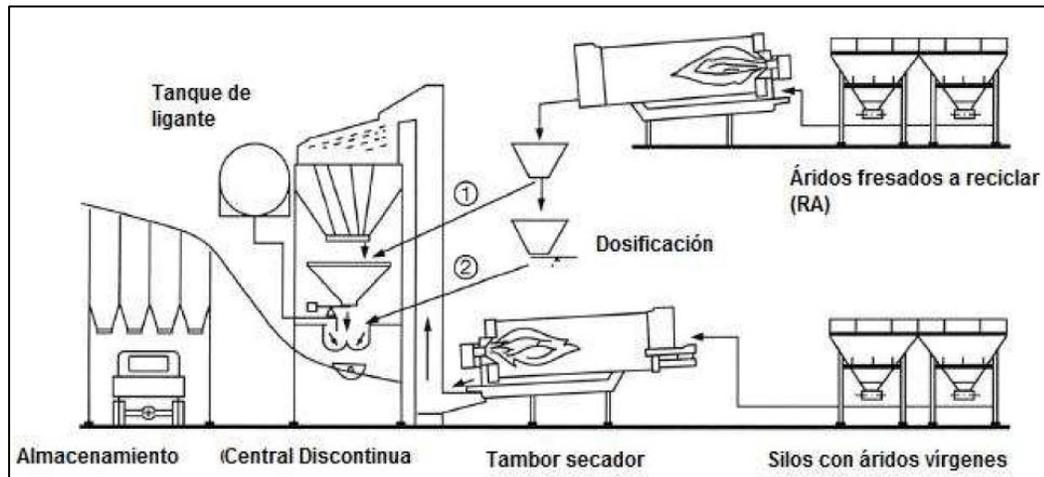
Fuente: Comité Technique AIPCR C7/8 – “Recyclage des Chaussées”

c) Centrales discontinuas con tambor secador independiente (tambor paralelo)

El tambor secador adicional tiene su propio dispositivo para secar el árido fresado y calentarlo hasta los 130° C. Así el árido fresado (RAP), una vez calentado, se transportará hasta la amasadora donde se adicionará el árido virgen ligeramente sobrecalentado, de forma que la temperatura final sea de unos 160° C.

Añadiendo el RAP seco y precalentado, la cantidad máxima a incorporar a la mezcla puede ser de entre un 50% a un 80%, siempre y cuando se pueda garantizar que el árido fresado es de buena calidad.

Figura 2.3. Central discontinua con tambor paralelo

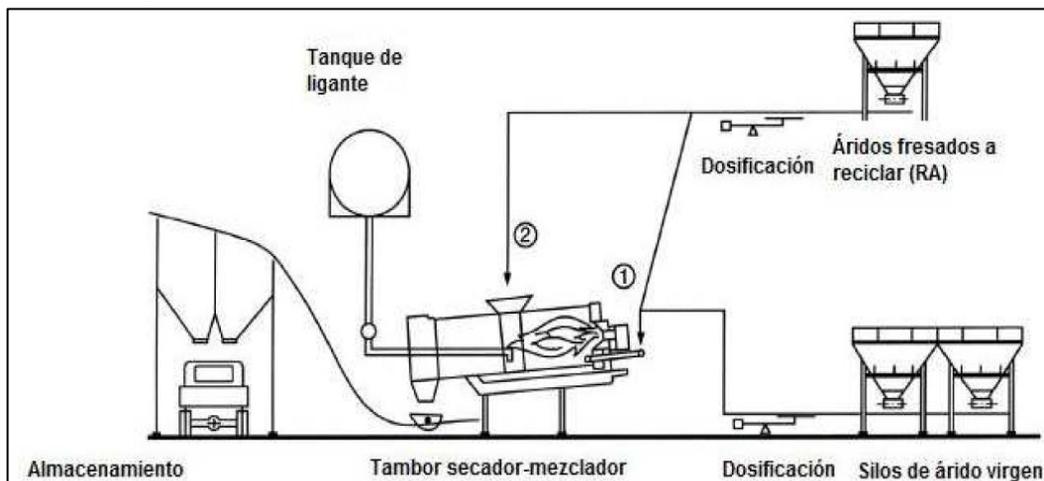


Fuente: Comité Technique AIPCR C7/8 – “Recyclage des Chaussées”

d) Tambor secador-mezclador (Central continua)

En general, el RAP se añade en el centro del tambor, lejos de la influencia de la llama del secador, para impedir que se queme el betún que lleva incorporado. En este tipo de centrales, la cantidad máxima de árido fresado a utilizar en la mezcla es del 50%, como en el caso de las centrales discontinuas con tambor secador independiente.

Figura 2.4. Central discontinua con tambor secador - mezclador



Fuente: Comité Technique AIPCR C7/8 – “Recyclage des Chaussées”

2.9.2. RECICLADO “IN SITU” EN CALIENTE

Esta técnica de reciclado in situ se realiza mediante calentamiento de la superficie del firme entre 120°C y 160°C para facilitar su disgregación por escarificado (esto evita degradaciones de los áridos y granulometría, como ocurre con el fresado) y se procede a la mezcla y homogeneización posterior del material disgregado y los de adición (ligantes, áridos o mezclas bituminosas). El calentamiento del pavimento a estas temperaturas necesita una técnica especial y cuidada para evitar excesivas emisiones contaminantes y el envejecimiento del betún. Una solución para minimizar este problema, es calentar una fina capa en superficie y realizar numerosas pasadas. Son tratamientos de la capa de rodadura (3 a 5 cms de espesor) para corregir características superficiales (pulimento de áridos, textura, fisuración por envejecimiento de ligante, regularidad longitudinal o transversal). La limitación en temperatura máxima en superficie (por degradación del ligante y emisión de humos) limita el espesor del tratamiento, por lo que la técnica ve reducida su campo de actuación.

Otra técnica consiste en generar una corriente de aire caliente (a 600°C) e introducirlo en el pavimento, en lugar de calentar directamente la superficie. Controlando la combustión se puede controlar el nivel de oxígeno y no se produce una excesiva oxidación en el material. El aire caliente se puede recircular, lo que supone un ahorro de energía, lo que supone una ventaja añadida para esta técnica.

2.9.3. RECICLADO EN PLANTA EN FRÍO

La técnica del reciclado en planta en frío consiste en fabricar un mezcla bituminosa a partir del material fresado de un firme (RAP) trasladado a una planta de fabricación continua y utilizando como ligante emulsión o espuma de betún, con eventual adición de cal o cemento y áridos correctores de granulometría. Se obtiene un producto similar a la grava-emulsión.

Esta forma de reciclado está muy cerca de la técnica in situ en lo que a condiciones de materiales se refiere, formulación de la mezcla, condiciones de utilización y puesta en obra.

La diferencia esencial está ligada al almacenamiento intermedio que sufren los materiales fresados, y al lugar donde se elabora la mezcla. En la Figura 7 se observa una planta de reciclado en frío.

Como ventajas en comparación con los reciclados in situ, se pueden citar (Writgen, 2010):

- Un mayor control de los materiales para la fabricación de la mezcla. El RAP puede tratarse mediante machaqueo y sustitución de áridos en caso de existir material no deseable.
- Calidad de la mezcla. Se pueden realizar ajustes en la planta para variar tiempos de mezclado, mejorando la calidad de la mezcla.
- La mezcla resultante se puede almacenar y utilizar cuando sea requerida, considerando siempre los tiempos de almacenaje, especialmente cuando la mezcla incluya cemento en su composición.

2.9.4. RECICLADO “IN SITU” EN FRÍO

2.9.4.1. RECICLADO IN SITU EN FRÍO CON CEMENTO

Este es un procedimiento que se basa en el fresado en frío de un cierto grosor del firme envejecido y el mezclado de este material con un conglomerante hidráulico (cemento). El nuevo material se extiende y se compacta definiendo una sólida base para posteriores refuerzos.

Esta técnica presenta numerosas ventajas en la rehabilitación de carreteras degradadas que necesitan un aumento de su capacidad portante. El progreso de la técnica, ha hecho que esta solución haya sido tomada en cuenta en lugar de otros métodos clásicos como la reconstrucción o el tratamiento superficial. En muchas ocasiones, el reciclado con cemento es la opción de rehabilitación más económica. En principio, no existen contraindicaciones para utilizar capas recicladas con cemento en carreteras de fuerte circulación, siempre y cuando, estas capas sean recubiertas con un revestimiento de mezcla bituminosa de espesor suficiente (alrededor de 4 cm).

Actualmente se disponen de máquinas recicladoras capaces de tratar de manera eficaz capas de firme de hasta 35 cm de espesor en una sola pasada. En la mayoría de los casos, son las prestaciones del compactador lo que limita el espesor a tratar.

Todos los tipos de cemento pueden ser utilizados para el reciclado, aunque los más usados son aquellos que incorporan aditivos activos, que aumentan el tiempo de manejabilidad.

Debido a la heterogeneidad de los materiales a reciclar, las variaciones en las propiedades mecánicas de los materiales tratados con cemento son particularmente grandes. En testigos extraídos de carreteras recicladas con esta técnica, se pueden encontrar variaciones en los valores de resistencia a la tracción de entre 0,4 y 2,5 MPa. Los módulos de elasticidad correspondientes pueden situarse entre 3500 y 37500 MPa. Son muchos los factores que pueden influir en la variación de estos resultados, desde las grandes diferencias entre los materiales a tratar, hasta las propiedades de la mezcla (contenido de cemento, agua, densidad obtenida tras la compactación,...). A pesar de todo, las capas recicladas con esta técnica presentan un módulo de elasticidad elevado y como consecuencia de ello, una gran capacidad portante. Esto provoca una importante reducción de las deformaciones en las capas de rodadura, así como de las tensiones y deformaciones en la capa de base, en comparación con la estructura anterior al reciclado.

Los materiales reciclados con cemento pueden presentar fisuras transversales debidas al efecto combinado de la retracción, las sollicitaciones del tráfico y el gradiente térmico. La prefisuración de las capas tratadas mediante cortes con un intervalo de unos tres metros, constituye el remedio más eficaz para minimizar el efecto de estas posibles fisuras en las capas bituminosas superiores. (Díaz, 2005).

2.9.4.2. RECICLADO “IN SITU” CON EMULSIÓN

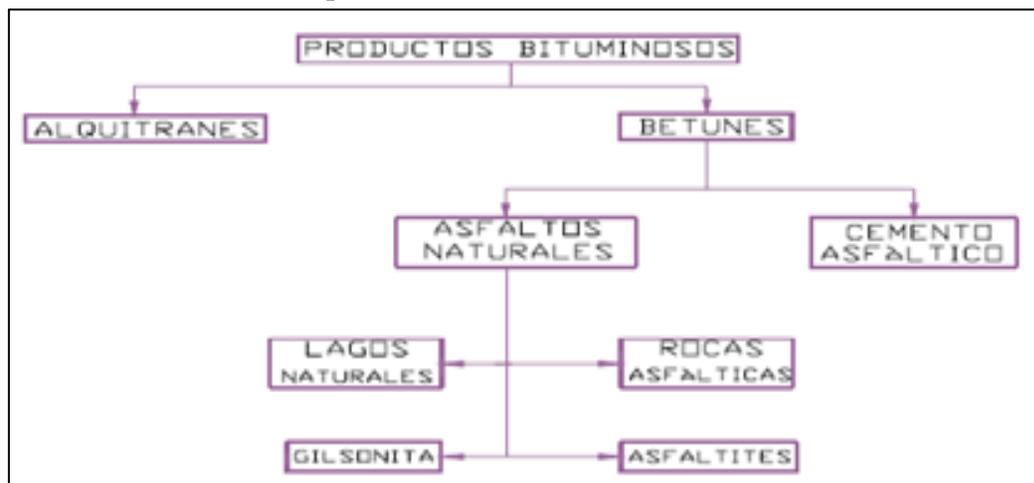
El reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa es una técnica cuyo objetivo fundamental es la transformación de un firme degradado en una estructura homogénea y adaptada al tráfico que va a soportar. Se realiza con equipos específicos multifunción que fresan el material, lo mezclan con agua y emulsión y lo extienden, realizándose todo este proceso a temperatura ambiente. Se aprovecha el 100% del material, por lo que presenta numerosas ventajas al disminuir transportes de material a la planta para su tratamiento y posteriormente transporte del material nuevo reciclado a su lugar de

origen. Al ser una técnica en frío, supone un ahorro energético ya que no precisa de calentamiento de materiales.

2.10. BETUNES ASFÁLTICOS

Los betunes asfálticos se definen como productos derivados del petróleo de aspecto oscuro y viscoso, con características aglomerantes y propiedades termoplásticas que hacen apropiado su empleo de firmes. También reciben el nombre de betunes de penetración, ya que es el ensayo de penetración quien los caracteriza y clasifica.

Esquema 2.1. Productos Bituminosos



Fuente: The Asphalt Institute "Asphalt Cold – mix Recycling".

Existen dos formas conocidas de procedencia de los betunes aptos para su empleo en carreteras:

- a) Betunes Naturales.- Proceden de la descomposición de organismos marinos, aflorando a la superficie en lagos de asfalto o impregnados en las rocas.
- b) Betunes Artificiales.- Se obtienen como subproductos del petróleo, una mezcla de hidrocarburos con impurezas.

En general, todos los betunes presentan una serie de características físicas comunes, tales como su color oscuro, la facilidad de presentar buena adhesividad con la superficie de las partículas minerales o su inmiscibilidad con el agua.

Sus propiedades más destacables de los betunes desde el punto de vista de la técnica de construcción de carreteras son las siguientes:

- 1) Adhesividad.- Facilidad que presenta el betún para adherirse a la superficie de una partícula mineral.
- 2) Viscosidad.- Se define como la resistencia que oponen las partículas a separarse, debido a los rozamientos internos que ocurren en el seno del fluido. En el caso de los betunes, varía con la temperatura, lo que da una idea de susceptibilidad térmica.
- 3) Susceptibilidad Térmica.- Indica la propensión que presenta el betún a variar ciertas propiedades reológicas con la temperatura. Gracias a esta propiedad pueden manejarse con facilidad a altas temperaturas, presentando una mayor estabilidad a temperatura ambiente.
- 4) Plasticidad.- Define el comportamiento mecánico del betún ante diferentes estados físicos y temporales de carga. Un betún poco plástico no soportará deformaciones excesivas sin que se produzcan grietas o desconchamientos.
- 5) Envejecimiento.- Fenómeno de degradación y transformación química de los componentes del betún debido a la acción oxidante del aire y la presencia de humedad y radiaciones solares, haciendo que el betún pierda sus propiedades reológicas y adhesivas.

2.11. 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.

2.11.1 PROPIEDADES DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

Seguidamente se comentan las principales propiedades que pueden presentar las mezclas bituminosas convencionales (que pueden extenderse a las recicladas) y que son las que permitirán su aplicación en proyectos que presenten diferentes condicionantes.

a) Estabilidad

La estabilidad es la capacidad de soportar las cargas del tráfico y resistir las tensiones provocadas con unas deformaciones tolerables.

Se trata de una propiedad intrínseca de la mezcla que depende principalmente de la cohesión y del grado de rozamiento interno de las partículas. Debido al comportamiento viscoelastoplástico de la mezcla comentado anteriormente, la cohesión aumenta con la viscosidad del betún y desciende con la temperatura del pavimento, mientras que el rozamiento interno aumenta con la angulosidad de las partículas y con una textura superficial áspera. Esta combinación de fricción y cohesión interna evita que las partículas de árido se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico. El contenido de betún también hace aumentar gradualmente la cohesión hasta un determinado punto en el que la película de betún tiene un cierto espesor que provoca una pérdida de fricción entre las partículas.

La falta de estabilidad causa roderas (deformaciones plásticas) longitudinales y resaltos transversales en zonas donde los esfuerzos tangenciales son elevados. Estos defectos se producen fundamentalmente por la acción de cargas lentas a altas temperaturas o por la de cargas alternativas que provocan la fatiga del material.

La estabilidad o carga de rotura se suele evaluar mediante ensayos de base empírica. Los más conocidos son el ensayo Marshall para mezclas gruesas y el Hubbard-Field para mezclas finas.

b) Durabilidad

La durabilidad es la capacidad que tiene el pavimento para resistir deterioros superficiales (baches, fisuras, superficies avirugadas, peladuras) provocados por la acción del tráfico u otras agentes externos como la radiación solar, la oxidación del ligante producida por el aire y el agua, el efecto de la helada, la utilización de sales fundentes, los vertidos de aceites y combustibles, etc.

El envejecimiento de las mezclas bituminosas se manifiesta por micro fisuras, pérdidas de mortero, desenvuelta del árido grueso, etc. Se considera un fenómeno muy complejo debido a la variedad de causas que lo provocan y la dificultad para definir los procesos fisicoquímicos que se producen. Algunos de estos procesos son irreversibles y otros pueden detenerse o minimizarse mediante el uso de agentes rejuvenecedores que actúan sobre el ligante de la mezcla devolviéndole sus características reológicas iniciales. Otra forma de mejorar la durabilidad de la mezcla es utilizando la mayor cantidad posible de betún, con una granulometría densa de árido y una buena adhesividad árido-ligante.

c) Impermeabilidad

La impermeabilidad es la resistencia al paso del aire y el agua a través de la masa de la capa de la mezcla bituminosa.

Esta propiedad se relaciona con el contenido de huecos de la mezcla compactada, aunque el grado de impermeabilidad viene determinado por el tamaño de los huecos y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento. Una mezcla mal compactada y con un bajo contenido de betún facilitará el acceso del agua y el aire al pavimento.

En consecuencia se han de dotar a las mezclas de las capas superiores del firme de una elevada impermeabilidad que proteja la infraestructura frente a la acción del agua sobre la explanada y beneficie al usuario en temas de seguridad y comodidad en la conducción, evitando el fenómeno del hidropneumático y la pulverización de agua. Sin embargo, esta impermeabilidad no tiene por qué estar confiada a la capa de rodadura, habiéndose desarrollado para ello las denominadas mezclas porosas en las que la impermeabilidad se garantiza mediante la capa inferior.

d) Trabajabilidad

La trabajabilidad se define como la facilidad con la que una mezcla puede ser extendida y compactada.

La trabajabilidad depende del tipo de árido y de su granulometría. De esta manera, la tendencia a la segregación de una mezcla gruesa puede disminuirse mediante la adición de un árido fino o mayor contenido de ligante, procurando que también se verifiquen los criterios de contenido de huecos y estabilidad. El exceso de relleno mineral contribuirá a una mayor viscosidad de la mezcla complicando así su compactación.

El tipo y el porcentaje de betún también pueden influir en la trabajabilidad ya que una temperatura demasiado baja en la mezcla afectará a la viscosidad del betún haciendo que la mezcla sea poco trabajable.

e) Flexibilidad

La flexibilidad es la capacidad de un pavimento para acomodarse a movimientos de la estructura, debidos a asientos de la explanada o a los efectos de dilatación y retracción térmica, sin llegar a fisurarse o romperse.

La flexibilidad de una mezcla bituminosa es función básicamente del contenido de ligante, siendo las mezclas más flexibles cuanto mayor sea su contenido de ligante.

Comúnmente, una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de ligante es más flexible que una mezcla densa con bajo contenido de ligante. Este factor se contrapone al requerimiento para obtener una buena estabilidad de la mezcla haciendo falta equilibrar ambos requisitos.

Si las mezclas van a ser extendidas con un espesor total inferior a 10 cm o sobre firmes flexibles existentes, han de tener suficiente flexibilidad para que no se rompan o se fatiguen con excesiva rapidez. Ese sería el caso de las mezclas sobre firmes constituidos por capas granulares. En estas situaciones debe valorarse la conveniencia de recurrir a mezclas abiertas en frío o incluso a riegos con gravilla, que en vías de bajo tráfico constituyen siempre la mayor solución.

f) Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga se define como la resistencia a la rotura a flexión bajo el efecto de cargas repetidas del tráfico, manifestada por una pérdida de rigidez y posteriormente una fisuración generalizada conocida como “piel de cocodrilo”.

También se puede definir como la alteración producida en la respuesta de formación al bajo los efectos de la repetición periódica de una sollicitación inferior a la de rotura.

Entre los factores que pueden influir en la resistencia a la fatiga de la mezcla destaca la porosidad, en el sentido de que cuando el porcentaje de huecos de una mezcla aumenta la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Esta resistencia también bajará considerablemente debido a un envejecimiento del betón y a un bajo contenido de éste, así como a una inadecuada compactación de la explanada y del firme.

La determinación de la resistencia a fatiga de una mezcla bituminosa se lleva a cabo en laboratorio sometiendo las probetas a ensayos de cargas repetidas. Para diferentes deformaciones radiales impuestas se obtiene el número de aplicaciones de carga que conduce a la rotura del material. De esta forma se establecen las denominadas leyes de fatiga que, en escala doblemente logarítmica, son rectas de pendiente negativa.

g) Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento es la capacidad de una superficie para atenuar el deslizamiento de las ruedas de los vehículos, especialmente cuando esta superficie está mojada, de forma que puedan efectuar el frenado en una distancia razonable. El objetivo es que neumático se mantenga en contacto con el pavimento en lugar de rodar sobre la película de agua (fenómeno conocido como hidroplaneo).

Una superficie áspera y rugosa tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie pulida y lisa. Para obtener estas características hay que evaluar la textura del árido y su resistencia al pulimento, así como la granulometría de la mezcla.

En el caso de carreteras con tráfico intenso y rápido, el árido grueso usado (en el caso de mezclas recicladas, tanto en el RAP como en el árido de aportación) ha de tener un alto coeficiente de pulimento acelerado y la macro textura de la mezcla puesta en obra ha de ser suficientemente rugosa, aunque intentando minimizar el ruido.

Tabla 2.2: Propiedades de Mezclas Bituminosas Convencional y Reciclada

PROPIEDAD	DEFINICIÓN	VARIABLES QUE PUEDEN INFLUIR
RIGIDEZ	Relación entre tensión y deformación a una temperatura y tiempo de carga dados	Granulometría del árido Rigidez del betún Grado de compactación Sensibilidad al agua Contenido de betún
ESTABILIDAD	Resistencia a la deformación permanente (generalmente a altas temperaturas y largos periodos de aplicación de carga)	Textura superficial del árido Granulometría del árido Rigidez del betún Contenido de betún Grado de compactación Sensibilidad al agua
DURABILIDAD	Resistencia a los efectos climáticos (aire y agua) y a la acción abrasiva del tráfico	Contenido de betún Naturaleza del betún Granulometría del árido Grado de compactación Rigidez del betún Sensibilidad al agua
RESISTENCIA A LA FATIGA	Aptitud de la mezcla para flexionar repetidamente sin romperse	Granulometría del árido Contenido de betún Grado de compactación Rigidez del betún Sensibilidad al agua
RESISTENCIA A LA FISURACIÓN	Resistencia de la mezcla a la fisuración por tensiones de tracción	Granulometría del árido Tipo de árido Contenido de betún Grado de compactación Rigidez del betún Sensibilidad al agua
RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO	Resistencia de la mezcla para proporcionar un coeficiente de fricción adecuado entre el neumático y el pavimento en condiciones húmedas	Textura y resistencia al pulimento del árido Granulometría del árido Contenido de betún
PERMEABILIDAD	Capacidad del aire, agua o vapor de agua para moverse dentro y a través de la mezcla	Granulometría del árido Contenido de betún Grado de compactación Rigidez del betún Sensibilidad al agua

Fuente: ASTEC, 1998

2.12. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS EN CALIENTE

El diseño de las mezclas se puede realizar tanto con el método Marshall o con el método Hveem, de la siguiente manera:

Combinar el agregado proveniente del pavimento asfáltico recuperado con materiales granulares recuperados y/o agregado pétreo nuevo, necesario para obtener una granulometría combinada que cumpla con los requisitos de las especificaciones. Una vez que se determinan las proporciones relativas de los mismos, se calcula la demanda total de asfalto. Se selecciona la clase de asfalto nuevo para restaurar el asfalto envejecido y obtener un ligante final que reúna las necesidades funcionales de las especificaciones del asfalto, satisfaciendo la demanda de la mezcla. Siguiendo estas determinaciones, se realiza el diseño de la mezcla por los procedimientos Marshall o Hveem y se determina la cantidad exacta de ligante total.

Con la información obtenida de la evaluación de los materiales, se establecen fórmulas para el diseño de la mezcla reciclada en caliente. La viscosidad del asfalto a 60°C es el parámetro de ensayo usado en este procedimiento para identificar el asfalto en el pavimento recuperado y en la mezcla reciclada.

2.12.1. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Los pasos a seguir en el procedimiento de diseño, se detallan a continuación:

2.12.1.1. Materiales

Los materiales que constituyen los reciclados in situ son el fresado ó RAP, la emulsión bituminosa, áridos de aportación en los casos que sean requeridos, agua de aportación para favorecer la envuelta de los áridos y la compactación y en algunos casos aditivos.

2.12.1.1.1. Material Fresado

El material disgregado, el RAP, es el componente principal de los reciclados de firme. Supone entre el 80-90% del total de la mezcla resultante en la mayoría de los casos. Está constituido por un conjunto de partículas pétreas, recubiertas o no por ligante hidrocarbonado envejecido, y suele presentar cierta heterogeneidad.

De acuerdo con las características y el estado de las capas del firme, se determinará si existen zonas en las que no deba utilizarse el material

existente. En algunos casos, como ocurre en España, se prohíbe expresamente reciclar el material procedente de pavimentos con deformaciones plásticas. En tal caso los materiales se retirarán y transportarán a un lugar autorizado y se sustituirán por un material adecuado, que podrá ser material fresado procedente de localizaciones distintas a la que se esté reciclando.

La calidad del RAP es un factor muy importante en el reciclado de mezclas bituminosas y depende de:

- 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.

La contaminación del RAP debe ser inexistente o muy pequeña, ya que la presencia de partículas de arcilla puede provocar defectos superficiales como ‘verrugas’ o protuberancias en el pavimento.

2.12.1.1.2. Áridos de Aportación

En determinadas actuaciones, aunque no con carácter general, es preciso realizar correcciones granulométricas mediante la aportación de nuevos áridos. Éstos deberán ser de buena calidad y cumplir las prescripciones correspondientes relativas al empleo de áridos en mezclas bituminosas.

La necesidad de la adición de nuevos áridos vírgenes a la mezcla puede ser debida a una serie de factores como son:

- Mejora de la granulometría. El pavimento existente puede no tener la granulometría deseada, o aún siendo así, ésta puede cambiar durante su proceso de demolición. De esta manera, añadir nuevos áridos permite mejorar la gradación de la mezcla reciclada modificándola hasta un rango aceptable.
- Calidad de los áridos. Aunque la granulometría fuera adecuada, puede suceder que la calidad de los áridos en la mezcla original no sea la óptima. Una excesiva presencia en el RAP de granulados rodados debido a su economía puede ser corregida mediante la adición de nuevos áridos.
- Exceso de filler en el RAP. Originariamente, el pavimento del que se obtiene el RAP contendrá una cantidad de filler igual o superior a la permitida en normativas actuales. Además, durante el proceso de

demolición, este porcentaje normalmente se incrementa del 1 al 3% adicional. De esta manera, para controlar la calidad del filler en la mezcla final se debería limitar la cantidad de éste en los nuevos granulados.

2.12.1.2. Agregados combinados en la mezcla reciclada

Usando la granulometría del agregado obtenido del pavimento asfáltico, y del agregado nuevo, se calcula una granulometría combinada que reúna los requerimientos deseados, que son los mismos exigidos para mezclas convencionales de concreto asfáltico.

2.12.1.3. Demanda de asfalto para la combinación de agregados

Puede determinarse por el ensayo CKE (equivalente centrífugo de kerosene) o estimarse con la formula 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(Nº8).
- b = Porcentaje de material entre 2.36 mm y 75µm (Nº8 y Nº 200).
- c = Porcentaje de partículas menores a 75µm (Nº 200).
- K = 0.15 si el porcentaje inferior a 75 µm está entre 11 y 15; 0.18 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.

2.12.1.4. 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.

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

P_p = 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:

$$P_a = \frac{100 * P_r}{100 - P_r}$$

2.12.1.5. 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.

2.12.1.6. Transporte, puesta en obra y compactación de mezclas asfálticas recicladas en caliente en planta

Para el transporte, puesta en obra y compactación de las mezclas recicladas en caliente en planta, se utilizan los mismos procedimientos y equipos que se emplean cuando se trata de mezclas convencionales. La única diferencia que se ha señalado en alguna ocasión, es que para porcentajes muy elevados de MBR en las mezclas, pueden ser menos trabajables que las convencionales.

Otro factor que puede ser importante dada la posible heterogeneidad de estas mezclas, es extremar los controles durante todo el proceso para asegurar la calidad final de las capas de firme construidas con estas mezclas.

2.13. CRITERIOS DE DISEÑO NORMALIZADOS

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:

Tabla 2.3: Ensayos de laboratorio Normalizados para Agregados

Ensayo de laboratorio para AGREGADOS	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T 27 ASTM C 136	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de la carpeta asfáltica es de primordial importancia porque en función de ellas se conoce de ante mano qué clase de textura tendrá la carpeta.
Desgaste	AASHTO T 96 ASTM C 131	EL objeto es conocer la calidad del material pétreo desde el punto de vista de su desgaste, ya sea por el grado de alteración del agregado, o por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste. Esta característica esencial cuando el agregado va a estar sujeto a desgaste por abrasión como en el caso de los pavimentos. Es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comportarán los agregados, bajo los efectos de la abrasión causada por el tráfico además de la idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.
Sanidad usando Sulfato de Sodio	AASHTO T 104 ASTM C 88	Permite obtener la información de estabilidad de un agregado bajo la acción de agentes atmosféricos. Los agregados inestables (se disgregan ante la presencia de condiciones atmosféricas desfavorables) resultan evidentemente insatisfactorios como agregados para mezcla en rodadura en pavimentos, especialmente cuando éstos tendrán una gran porción de su superficie expuesta a los agentes atmosféricos, el valor del error permisible no debe ser mayor de 0.5%.
Equivalente de Arena	AASHTO T 176 ASTM D 2419	Descubre el exceso de arcilla en los agregados, ya que es un medio rápido para separar las partículas más finas (arcillosas) de los granos más gruesos o de la arena.
Cubicidad de Partículas	ASTM D 692	Se utiliza para determinar valores como el índice de laja y la cubicidad de las partículas que componen el material pétreo. Las partículas de los agregados, deben ser limpias, duras, resistentes y durables por lo que debe evitarse partículas débiles quebradizas o laminadas ya que son perjudiciales.
Gravedad específica y absorción del agregados gruesos y finos	AASHTO T 84 AASHTO T 85 ASTM C - 127 ASTM C - 128	La gravedad específica aparente se refiere a la densidad relativa del material sólido de las partículas constituyente, no se incluye aquí los espacios vacíos (poros accesibles) que contienen las partículas los cuales son accesibles al agua. El valor de absorción es usado para calcular el cambio en el peso de un agregado provocado por el agua absorbida en los poros accesibles de las partículas que constituyen el material comparado con la condición seca cuando se evalúa el comportamiento del agregado con el agua durante un período largo tal, que se logre alcanzar el valor potencial de absorción del mismo.
Peso Unitario y Vacío	AASHTO T 19 ASTM C 29M	En la práctica el valor de peso unitario es muy utilizado para realizar conversiones de volúmenes a pesos de los agregados a utilizar en las mezclas de concreto asfáltico. La dosificación óptima de mezclas de agregados para mezclas de superficie en pavimentos puede realizarse utilizando el método de pesos unitarios, el cual consiste en elaborar una gráfica (parecida a la del Próctor) en la cual se grafica las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las ordenadas.

Fuente: The Asphalt Institute.

Tabla 2.4: Ensayos de laboratorio Normalizados para Asfaltos

Ensayo de laboratorio para ASFALTOS	Norma	Propósito
Viscosidad	AASHTO 201. ASTM D 2170	En el diseño de mezclas asfálticas, las temperaturas de mezclado y compactación se definen en función de la viscosidad que posee el Cemento asfáltico, ya que la trabajabilidad de una mezcla asfáltica, se ve influenciada por la trabajabilidad que el asfalto tenga dentro de esta misma a una temperatura determinada de trabajo. Este ensayo se usa para clasificar los Cementos Asfálticos a Viscosidad 60°. Mide la consistencia de los Cementos Asfálticos
Penetración	AASHTO T 49 ASTM D 5	Clasifica los asfaltos en grados según su dureza o consistencia medida en décimas de milímetros. Valores altos de penetración, indicarán consistencias suaves.
Punto de Inflamación	AASHTO T 48 ASTM D 92	Tiene por propósito, identificar la temperatura a la cual el asfalto puede ser manejado y almacenado sin peligro que se inflame. El punto de inflamación se mide por el ensayo en copa abierta Cleveland.
Ductilidad	AASHTO T 51 ASTM D 113	Provee de una medida de las propiedades al estiramiento de los cementos asfálticos y el valor resultante puede ser usado como criterio de aceptación del material asfáltico ensayado. Se considera la ductilidad como la capacidad que tiene el asfalto de resistir esfuerzos de estiramiento bajo condiciones de velocidad y temperatura especificada.
Punto de reblandecimiento	AASHTO T 53 ASTM D 36	La temperatura determinada como de Reblandecimiento, representa aquella a la cual un cemento asfáltico alcanzará un determinado estado de fluidez, existiendo consecuentemente una pérdida de consistencia del mismo. El punto de reblandecimiento es una prueba de resistencia a la deformación del cemento asfáltico y además es también una prueba de la viscosidad.
Ensayo de flotación	AASHTO T 50 ASTM D 139	Esta prueba caracteriza el comportamiento al flujo o consistencia de ciertos materiales bituminosos, que por su bajo grado de dureza no pueden ser ensayados utilizando el método de penetración. Este ensayo es utilizado para medir la consistencia del residuo de destilación de los asfaltos rebajados de fraguado lento.
Solubilidad en Tricloroetileno	AASHTO T 44 ASTM D 2042	Este ensayo indica la porción de constituyentes cementantes activos en el asfalto ensayado es decir se utiliza para medir la pureza del asfalto. En esta prueba las sales, el carbono libre y los contaminantes inorgánicos, se consideran impurezas.
Peso específico	AASHTO T 228 AASHTO T 85 AASHTO T 84	El peso específico de un cemento asfáltico no se indica normalmente en las especificaciones de la obra pero existen dos razones por las cuales se debe conocer su valor y son: <ul style="list-style-type: none"> • Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura – volumen. • Es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos de un pavimento compactado. Se determina normalmente por el método del picnómetro.
Endurecimiento y envejecimiento	AASHTO T 51 ASTM D 113	Tiene por propósito exponer una o varias muestras a condiciones similares ocurridas durante las operaciones de plantas de mezclado en caliente.

Fuente: The Asphalt Institute.

2.13.1. Requisitos del agregado pétreo

Tabla 2.5: Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.

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

Fuente: SCT, 2003.

Tabla 2.6: Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.

Malla		Tamaño				
Abertura mm	Designación	12.5 mm (1/2 ")	19 mm (3/4 ")	25 mm (1 ")	37,5 mm (1 1/2 ")	50 mm (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	47-65	39-59
4,75	No.4	68-82	59-74	50-64	42-58	35-53
2	No.10	48-64	41-55	36-64	30-42	26-38
0,85	No.20	33-49	28-42	25-35	21-31	19-28
0,425	No.40	23-37	20-32	18-27	15-24	13-21
0,25	No.60	17-29	15-25	13-21	11-29	9-16
0,15	No.100	12-21	11-18	9-16	8-14	6-12
0,075	No.200	7-10	6-9	5-8	4-7	3-6

Fuente: SCT, 2003.

2.13.2. Requisitos del ligante asfáltico

Tabla 2.7: Requisitos de calidad para cemento asfáltico, clasificado por viscosidad dinámica a 60°C.

Características	Clasificación			
	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Del cemento original				
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa.s(P ¹)	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1 000 ± 200)	200 ± 40 (2 000 ± 400)	300 ± 60 (3 000 ± 600)
Viscosidad cinemática a 135°C; mm ² /s, mínimo (1 mm ² /s =1 centistoke)	175	250	300	350
Viscosidad Saybolt-Furol a 135 °C; s, mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25°C, 100 g, 5s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	140	80	60	50
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	177	219	232	232
Solubilidad,%, mínimo	99	99	99	99
Punto de reblandecimiento, °C	37-43	45-52	48-56	50-58
Del residuo de la prueba de la película delgada				
Pérdida por calentamiento, % máximo	1	0,5	0,5	0,5
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa.s(P ¹), máximo	200 (2 000)	400 (4 000)	800 (8 000)	1 200 (12 000)
Ductilidad a 25°C y 5 cmm/min; cm, mínimo	100	75	50	40
Penetración retenida a 25°C; %, mínimo	46	50	54	58

Fuente: SCT, 2005.

2.13.3. Técnicas de separado de los materiales que conforman la Carpeta Asfáltica

- a) MÉTODO ABSON PARA LA RECUPERACIÓN DE ASFALTO (ASTM D 1856 REV A AASHTO T170-00) (A0603)

Este método describe el procedimiento para recuperar, por el Método de Abson, el material bituminoso en el líquido extraído de las mezclas asfálticas, utilizando tricloroetileno.

El material bituminoso se recupera con propiedades que son sustancialmente las mismas que posee en la mezcla asfáltica y en cantidad suficiente para ensayos posteriores.

El material bituminoso puede extraerse de la mezcla asfáltica de acuerdo con el Método A0604 “Método para determinar el contenido de asfalto de mezclas por centrifugación - ensaye de extracción”.

b) MÉTODO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE LIGANTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR CENTRIFUGACIÓN - ENSAYE DE EXTRACCIÓN (A0604)

El método describe los procedimientos para determinar cuantitativamente el contenido de ligante asfáltico en una mezcla, mediante el proceso de centrifugación. Como solventes en el proceso de centrifugación se puede emplear tricloroetileno, cloruro de metileno o tricloroetano. A los áridos recuperados se le puede efectuar análisis granulométrico, de acuerdo con el Método A0602.

c) MÉTODO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE ASFALTO POR IGNICIÓN (AASHTO T 308-97) (A0617)

Este método de ensayo cubre la determinación del contenido de ligante asfáltico de Mezclas de Asfalto en Caliente (MAC) por ignición del ligante asfáltico a 538 °C (1000°F) o menos en un horno. El árido que queda después de la ignición puede usarse para análisis de cernido usando el Método A0602. Los valores en unidades métricas deben considerarse normales.

Esta norma puede involucrar materiales, operaciones y equipos peligrosos. Esta norma no considera todo lo que atañe a tópicos de seguridad, si hay alguno, asociado con su uso. Es responsabilidad de quién quiera que use esta norma, consultar y establecer prácticas apropiadas de seguridad y sanidad y determinar la aplicabilidad de limitaciones reglamentarias previas a su uso.

d) MÉTODO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE LIGANTE MEDIANTE EL EQUIVALENTE CENTRÍFUGO DE KEROSENE (ECK) (A0702)

Este procedimiento permite determinar el contenido aproximado de ligante asfáltico de una mezcla bituminosa, usando el equivalente centrífugo de kerosene (ECK). El ECK entrega un índice (K), que indica la rugosidad relativa de las partículas y la capacidad superficial basada en la porosidad.

e) MÉTODO NUCLEAR PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE ASFALTO DE UNA MEZCLA (ASTM D 4125 AASHTO T287-97) (A0908)

Este método permite determinar cuantitativamente el contenido de asfalto de mezclas bituminosas, examinando una muestra mediante neutrones. En atención a que se tienen resultados en pocos minutos, puede usarse para determinar rápidamente el contenido de asfalto de mezclas bituminosas para pavimento, lo que permite ejecutar

los ajustes apropiados que sean necesarios en el sistema de alimentación de asfalto de la planta. El procedimiento es útil en la determinación del contenido de asfalto solamente, ya que no permite extraer el asfalto para un análisis de graduación del árido.

A menos que la muestra para el ensaye esté completamente seca, determine el porcentaje de humedad y luego haga la correspondiente corrección para compensar por la humedad.

2.14. MÉTODO MARSHALL

Los conceptos originales para el Diseño Marshall fueron desarrollados por Bruce Marshall del Departamento de Caminos del Estado de Mississippi, y rediseñado por El Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estado Unidos en los años 40. Después se hicieron avances y el desarrollo de especificaciones de materiales por organizaciones como el Cuerpo de Ingenieros y el Instituto del Asfalto.

Como cualquier otro método de diseño de pavimentos, el punto de partida es obtener muestras de materiales representativos de aquellos que serán usados para el proyecto. Este método usa unas muestras estándar de 2 ½ pulgadas de alto y 4 pulgadas de diámetro. Estos se preparan usando un procedimiento específico para calentamiento, mezclado y compactado de las mezclas de agregado y asfalto. Las dos características principales del método de Marshall, son las de análisis de densidad y vacíos en la mezcla y los resultados de estabilidad y flujo de las muestras compactadas.

2.14.1. Criterios de Selección de los Porcentajes de Implementación del Betún

Fórmula de Trabajo por el Método de Diseño Marshall. Esta comprende una banda de trabajo para el análisis Marshall:

Tabla 2.8. Criterios de selección de los números de porcentajes de cemento asfáltico necesarios para el diseño Marshall

Tamaño Máximo Nominal de Agregado	Nº de Porcentajes a utilizar	Tolerancia
> 1" (25.4 mm)	6	±1
1" (25.4 mm) a tamiz N°4 (4.75 mm)	5	±1
< tamiz N°4 (4.75 mm)	4	±1

Fuente: Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001.

2.14.2. Preparación de las Muestras de Ensayo

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenido de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final.

La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico.

Las mezclas se preparan de la siguiente manera:

- a) El asfalto y el agregado se calientan y mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- b) Las mezclas asfálticas calientes se colocan en moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de mezcla al golpearla.
- c) Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50, ó 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Ambas caras de cada biqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente, un total de 70 golpes; una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos y una probeta de 75 golpes recibe 150 impactos. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

2.14.3. Procedimiento del Ensayo

Existen tres procedimientos en el método del ensayo Marshall. Estos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad y la fluencia Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

2.14.4. Ensayos de Estabilidad y Fluencia

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

- a) Las probetas son calentadas en un baño de agua a 60 ° C (140 ° F). Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
- b) La probeta es removida del baño, secada, y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste en un dispositivo que aplica una carga sobre la probeta, y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).
- c) La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 in) por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta pueda resistir.
- d) La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

2.15. PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN

La práctica constructiva que se describe a continuación tiene lugar una vez que se ha determinado que la mejor opción de rehabilitación para la vía es un reciclado y se ha redactado el proyecto de construcción de la actuación.

2.15.1. ETAPAS DEL PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN

El procedimiento a seguir en las actuaciones de reciclados en caliente en planta presenta variaciones dependiendo del país en el que se realizan.

2.15.1.1. Inspección visual

Se necesita llevar a cabo una inspección visual del pavimento existente para definir tramos homogéneos, tipos y nivel de deterioros, zonas localizadas con deterioros importantes que puedan necesitar tratamiento específico, problemas relacionados con la presencia de bordillos, arquetas, obras de fábrica, estructuras y accesos y zonas donde se puedan estacionar los equipos de construcción. Toda esta información se debe reflejar en unos esquemas de fácil consulta.

2.15.1.2. Toma de muestras

La fase de toma de muestras es crítica no sólo desde el punto de vista del reconocimiento de la sección del firme a reciclar sino como paso previo para establecer la estrategia más adecuada para la ejecución de las obras.

La representación en un mismo diagrama del resultado de la inspección visual, de las auscultaciones y, si se dispone de él, del historial, proporciona una imagen más clara del estado del firme y permite asociarla a las zonas homogéneas que presentan un nivel similar de deterioro.

El muestreo del firme se realiza en puntos aleatorios determinados dentro de las zonas homogéneas.

Los materiales se deberían tomar con los equipos de disgregación con los que se va a realizar el reciclado. Sin embargo, es muy frecuente que las muestras extraídas del firme no estén disgregadas, esta circunstancia debe ser tomada en cuenta y, en la medida de lo posible, habría que estimar o simular en laboratorio los efectos de la futura disgregación, especialmente en la fase en la que se establezcan las fórmulas de proyecto.

Las muestras obtenidas se ensayan en laboratorio a fin de definir las características de los materiales a reciclar en cuanto a granulometría, calidad del árido grueso, limpieza, compactibilidad, homogeneidad.

Hay que comprobar además las características del betún de las capas que se vayan a reciclar y especialmente el contenido de betún residual, consistencia (penetración), punto de reblandecimiento y en ocasiones su contenido de asfaltenos y viscosidad.

2.15.1.3. Fórmula de trabajo

La definición de la fórmula de trabajo es la consecuencia de los ensayos realizados en el laboratorio, y las exigencias propias del trabajo a realizar. Para su determinación es fundamental que los materiales sean lo más representativos posible, no sólo respecto de su procedencia, sino también respecto al proceso de fresado o demolición al que van a ser sometidos.

El diseño de fórmulas de trabajo es todavía demasiado empírico debido principalmente a la falta de un método de estudio en laboratorio que permita recoger datos representativos del estado de los materiales después de la fragmentación y de simular la evolución de sus características en obra. Este empirismo se traduce en la utilización de ensayos de laboratorio convencionales, que no tienen en cuenta las características intrínsecas del material.

Hay una gran variación internacional sobre procedimientos para llegar a la fórmula de proyecto. Como similitudes a destacar entre los métodos se puede decir que en todos ellos la fórmula de trabajo refleja: la granulometría del material fresado, el porcentaje adicional de árido nuevo, correcciones necesarias para el árido en caso de que así se requiera, tipo y cantidad de aditivos, tipo de betumen y su porcentaje respecto al árido

seco. Sin embargo, en contrapartida, se encuentran diferencias considerables entre los distintos métodos, así por ejemplo, el diseño de las briquetas para la elección del contenido óptimo de ligante difiere en los porcentajes de betún adicional, para lo cual se aplica la fórmula de trabajo de Diseño del Método Marshall.

2.15.1.4. Tramo de prueba

Una vez definida la fórmula de trabajo en laboratorio se procede a la ejecución de obra, realizando en primer lugar un tramo de prueba por cada tramo homogéneo definido. Se utilizará el mismo equipo con el que se vaya a ejecutar la obra y se ajustarán parámetros como:

- La relación entre la velocidad de avance del equipo fresador y la granulometría y calidad de envuelta alcanzadas.
- La velocidad de rotación del rotor fresador, el número de picas y la frecuencia de su reposición.
- La exactitud de los sistemas de dosificación del agua, emulsión y aditivos, en su caso.
- La humedad óptima de compactación
- La composición y forma de actuación del equipo compactador, estableciendo las relaciones entre orden y número de pasadas de los compactadores y la densidad alcanzada.

2.15.1.5. Ejecución del reciclado

Aprobado el tramo de prueba se procede a la ejecución del reciclado. La superficie a tratar estará limpia y exenta de agua y los saneos necesarios en blandones y baches detectados en la inspección visual habrán sido corregidos.

El fresado o demolición se realiza con el equipo y método aprobados en la fórmula de trabajo. En aquellos casos en los que la anchura de la superficie a reciclar es mayor que el equipo de reciclado se trabaja por franjas paralelas, similar al proceso de ejecución de un pavimento convencional.

La compactación no se puede retrasar más de treinta minutos después de la extensión de la mezcla. Se realiza longitudinalmente, de manera continua y sistemática. Los rodillos tienen que llevar su rueda motriz en el lado más cercano a la recicladora y los cambios de dirección se tienen que hacer siempre sobre mezcla ya compactada.

En algunos casos para evitar desprendimientos superficiales o si se prevén lluvias durante el proceso de maduración de la mezcla, está justificado el empleo de un riego de protección, en el que se usa una emulsión de rotura rápida y con dotaciones de 200 a 300 gramos por metro cuadrado.

2.15.2. PROCEDIMIENTO PARA EL RECICLADO DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE EN PLANTA Y EQUIPO NECESARIO PARA REALIZARLO

El reciclado de pavimentos asfálticos en planta en caliente es un método de fabricación de mezclas cada vez más usado por diferentes administraciones en todo el mundo y, en general, la metodología utilizada es muy parecida en todos los países.

Gracias al gran desarrollo tecnológico que se ha presentado en los últimos años en los equipos y maquinaria para la construcción se ha podido dar un impulso muy grande al reciclado de pavimentos asfálticos en caliente en planta.

A continuación se describe el procedimiento general y la normativa y metodología de diseño empleados para el reciclado de pavimentos en caliente en planta, así como los equipos y maquinaria necesarios en cada uno de los diferentes pasos del proceso.

2.15.2.1. Recuperación de materiales de los pavimentos asfálticos deteriorados para su reciclado

Una vez que se conocen las características del firme que se va a rehabilitar y si este puede ser reciclado, se procede a la recuperación de los materiales de las capas bituminosas envejecidas, que se lleva a cabo mediante la demolición mecánica o el fresado de las capas bituminosas.

La demolición mecánica de las capas de firme mediante ripado con bulldozer o levantamiento con pala o retroexcavadora, es una de las alternativas más comúnmente usadas en las demoliciones de firmes, en especial cuando no hay requisitos precisos de reutilización posterior del material en procesos de reciclado o necesidad de un saneo por fresado para sustitución de un determinado espesor del firme.

Figura 2.5. Demolición mecánica de un firme



Fuente: ASTEC, 1998

Se genera así un material troceado, en bloques, con una cierta heterogeneidad de tamaños que necesita un tratamiento posterior por machaqueo, para obtener una granulometría adecuada para poder ser utilizado en las mezclas recicladas.

Por otra parte, el fresado en frío es la técnica necesaria cuando hay que remover un cierto espesor del firme, obteniendo una superficie plana y regular para apoyo de nuevas capas de mezcla.

Alrededor de 1970 (ASTEC, 1998) hicieron su aparición, por primera vez, las máquinas fresadoras de pavimentos asfálticos. Se trataba de modelos pequeños y con ancho de corte muy reducido. Con todo, hicieron ver las posibilidades que ofrecían en las tareas de rehabilitación de capas de firme necesitadas de ser sustituidas, de ahí que a lo largo de los años 70 estas máquinas conocieran un desarrollo cada vez más pronunciado.

Lógicamente aquellas primeras máquinas requerían de mucho mantenimiento y eran poco fiables, pero con el tiempo, han crecido no solo en tamaño y potencia sino que se ha mejorado sensiblemente en control, en el grado de eficacia y capacidad de producción, y además son mucho más sencillas de operar.

Actualmente, con una fresadora de carga frontal se puede cortar un carril completo, además de recoger automáticamente el material fresado sobre un camión para su retirada como se puede observar en la figura.

Figura 2.6. Fresado de capas bituminosas envejecidas



Fuente: ASTEC, 1998

Otra ventaja del fresado es que deja una superficie rugosa que sirve para unir con la capa nueva, además de que el material fino que permanece en la carretera, se derretirá casi instantáneamente al aplicar una nueva capa de mezcla caliente, y de este modo, las partículas finas se convierten en una capa ligante.

Las características de granulometría y tamaño máximo del producto obtenido por fresado son función de las características y estado de integridad de la capa a fresar, de la velocidad de avance de la fresadora, del espesor de fresado y de las características de la fresadora y del rotor (potencia, espaciamiento y tipo de picas, velocidad de giro, etc.). Así, puede llegar a conseguirse que el producto obtenido del fresado cumpla los requisitos de granulometría y tamaño máximo para ser utilizado directamente en procesos de reciclado. En caso contrario precisará también un postproceso de machaqueo o clasificación previo al de reciclado.

Una vez que se recuperan los materiales de los pavimentos asfálticos envejecidos, es necesario acarrearlo en camiones hasta la planta en donde será almacenado, y en su caso, procesado para su reciclado.

2.15.2.2. Proceso y acopio del MBR en planta

Si el material fresado es lo suficientemente homogéneo cuando llega a la planta, y el tamaño máximo de las partículas del mismo no superan las especificaciones para su utilización en mezclas bituminosas, puede ser acopiado directamente sin pasar por ningún proceso de machaqueo, ya que la tolva de alimentación del MBR de las

plantas de mezcla tienen una pre-criba que limita el tamaño máximo a reciclar y no permite que entren partículas de mayor tamaño que el especificado.

Cuando el MBR no precisa una gran reducción de tamaño, porque su dimensión máxima no es excesiva (50-100mm), recomienda una variante, en la que en el sistema de alimentación se incorpora una trituradora secundaria para reducir el material procedente de fresado a una granulometría uniforme 0/20 ó 0/30.

Si el MBR es procedente de la demolición de firmes ó tiene tamaños máximos de partículas superiores a los especificados para la fabricación de mezclas, será necesario realizar un machaqueo en planta que puede hacerse mediante una trituradora que cuente con una primera etapa de machaqueo por impacto y una segunda etapa con una criba y una trituradora de conos, de esta manera se reducirá el MBR a un todo uno con tamaño máximo de entre los 20-30mm, antes de ser acopiado para su almacenamiento.

Si se pretende utilizar porcentajes muy elevados de MBR (más del 30%) en la fabricación de mezclas, es recomendable separarlo en dos fracciones para asegurar que el producto final será suficientemente homogéneo, en este caso se debe utilizar una machacadora de dos etapas que cuente con una criba de dos pisos que nos permita obtener las dos fracciones requeridas, que serán acopiadas separadamente para evitar que se mezclen entre ellas.

En la siguiente figura presenta una procesadora de MBR capaz de separar el material fresado de pavimentos en diferentes fracciones.

Figura 2.7. Trituradora de MBR para obtener diferentes fracciones



Fuente: ASTEC <www.astecinc.com>

Una vez procesado, el MBR debe ser manipulado y almacenado como un árido convencional. De cualquier forma, algunas administraciones no permiten que se mezclen los fresados de diferentes obras en los mismos acopios.

El Asphalt Institute recomienda que la altura de los acopios se limite a un máximo de 3 metros para prevenir la aglomeración de las partículas de MBR. El tiempo de almacenamiento debe minimizarse para evitar que el contenido de humedad de los acopios se vuelva excesivo.

La experiencia ha probado que los acopios cónicos se comportan de una mejor manera que los acopios horizontales y ayudan a que el fresado no se reaglomere. El MBR tiene la tendencia de formar una costra de unos 20 cm, debido a los efectos del calor y de la radiación solar tanto en los acopios cónicos como en los horizontales. Esta corteza ayuda a evitar que el resto del MBR se aglomere y además se rompe fácilmente con un cargador frontal.

El material fresado de pavimentos tiene la tendencia de almacenar agua y no drenarla con el tiempo como los áridos normales. Los acopios bajos y horizontales acumulan más humedad que los cónicos y de mayor altura. Otra medida que puede servir para evitar la excesiva humedad del MBR es utilizar acopios techados pero sin paredes, para evitar la condensación de la humedad.

Cuando el MBR llega de muy distintas procedencias en pequeñas cantidades, será necesario hacer una serie de mezclados sucesivos para conseguir un acopio homogéneo aunque la procedencia no sea la misma.

Caracterización de los materiales que formarán parte de las mezclas recicladas

Una vez que se logran acopios de MBR homogéneos, es necesario caracterizar todos los materiales que formarán parte de las mezclas recicladas, es decir:

- MBR
- Áridos de aportación
- Ligante de aportación
- Rejuvenecedores (en caso de ser necesarios)

Los ensayos que deben realizarse a cada uno de los componentes de la mezcla reciclada para su correcta caracterización antes de que se proceda a su fabricación.

Diseño de las mezclas recicladas en caliente en planta y normativa para su utilización
La mayoría de las administraciones en el mundo utilizan para las mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta una metodología de diseño y unos

requerimientos de calidad prácticamente iguales a los que exigen a las mezclas convencionales, añadiendo algunas variaciones que ayuden a asegurar el buen comportamiento de éstas.

En general, el diseño de las mezclas recicladas debe incluir, la determinación de las propiedades del MBR y de los nuevos materiales que formarán parte de la mezcla, la selección de una apropiada proporción de MBR y árido virgen para cumplir con la granulometría especificada, la selección del tipo y contenido de ligante de aportación para satisfacer los requerimientos de viscosidad y/o penetración, estudiar la posible necesidad de agregar un agente rejuvenecedor para mejorar las características del betún contenido en el material fresado y verificar que se cumpla con los requerimientos especificados para el tipo de capa en donde se colocará la mezcla.

2.15.3. MAQUINARIA Y EQUIPOS DE EJECUCIÓN

En este apartado se hace sólo mención al equipamiento específico para las labores de reciclado y compactación. El equipo necesario para la ejecución de las obras puede estar compuesto por equipos independientes que realicen por separado las operaciones de fresado, dosificación y distribución de la mezcla asfáltica, o bien equipos que realicen dos o más de estas operaciones, excepto la compactación, de forma simultánea. Para cada una de las fases del proceso hay una o varias máquinas de uso múltiple a las que cabe recurrir aunque lo más usual es la utilización de equipos específicos, cada vez mejor adaptados, que realizan las operaciones ya mencionadas de una sola pasada.

El equipo de fresado, con anchura mínima de medio carril y dotada de rotor de fresado de eje horizontal, deberá fresar el firme existente en la profundidad y anchura necesarias para obtener la mezcla deseada, produciendo un material homogéneo con la granulometría requerida en una sola pasada y a una velocidad constante adecuada.

Las fresadoras estarán dotadas de un dispositivo de control automático que asegure el espesor deseado. También estarán provistas de un dispositivo que evite el levantamiento en bloques del material. En Europa está generalizado el fresado hacia arriba, mientras que en USA son corrientes los equipos de fresado hacia abajo que permiten obtener granulometrías más finas y uniformes, sobre todo cuando el firme está muy fisurado. (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001)

El mezclador garantiza una mezcla homogénea y uniforme en toda la anchura y profundidad del reciclado. La mezcla se realiza en las propias máquinas fresadoras

aprovechando la energía del rotor de fresado, disponiéndose el sistema de dosificación incorporado en el elemento de fresado.

Para la extensión se dispone un distribuidor que evita la segregación del material mezclado y realiza una extensión y precompactación homogéneas y con el perfil deseado, mediante una muestra de extensión con dispositivos de nivelación automáticos. Para los tráficos más fuertes y cuando se requiera un nivel de acabado mejor se evitará el extendido con motoniveladora.

2.15.3.1. EQUIPOS DE RECICLADO

El reciclado en planta, ya sea caliente como en frío, se limita a utilizar el equipo necesario para levantar el material por el método de demolición, el cual se lo realiza utilizando Tractores y/o Bulldozer para levantar la carpeta asfáltica deteriorada en trozos o volúmenes, y el equipo para cargar y transportar hacia la planta asfáltica, son los Tractores y las Volquetas, o para llevar la mezcla reciclada desde la planta asfáltica hacia el tramo de aplicación del reciclado, es necesario el uso de volquetas. Así también para el extendido de la mezcla asfáltica se usará Distribuidores de Mezcla y Escobas Mecánicas.

El reciclado in situ se realiza mediante equipos específicos que fresan el firme en una determinada profundidad, lo mezclan con el ligante y lo extienden. Existe una gran variación de maquinaria para la ejecución de los reciclados. Desde equipos muy sencillos hasta equipos completos que incluyen fresadora, machacadora, mezclador y sistema de extensión con regla de alta compactación. Pueden estar constituidos por varias máquinas trabajando a cierta distancia unas de otras o bien por varias máquinas trabajando conectadas entre sí o por una única máquina compacta. Se describen a continuación algunas posibles configuraciones que se utilizan con más frecuencia.

Fresadora-Machacadora-Mezcladora + Extendedora

Es una configuración empleada en USA y Canadá, pero no es normal en Europa y en España no se ha utilizado hasta el momento. Proporciona resultados de muy buena calidad y altos rendimientos pero tiene un elevado coste de adquisición.

Se trata de una fresadora de gran potencia, habitualmente de 3,50 m de ancho, unida a una plataforma sobre la que se ha dispuesto un equipo de machaqueo y cribado que permite procesar el material aportado por la fresadora limitando el tamaño máximo (generalmente a 20-25 mm, según espesor de capa). Con el material ya procesado se

alimenta un mezclador que va montado sobre la misma plataforma anterior o bien sobre otra solidaria de la anterior. La alimentación de emulsión y agua se realiza mediante cisternas conectadas por mangueras y la dosificación a través de bombas y contadores, de la misma forma que en la mayor parte de los equipos. En el caso de que se requiera un aporte de áridos para corregir granulometría, éstos se extienden sobre el pavimento, por delante del equipo.

Fresadora + Mezcladora-Extendedora

En este caso se emplean dos equipos trabajando en serie. El primero es una (o varias) fresadora convencional que levanta el pavimento. El material fresado debe llegar a la Mezcladora-Extendedora para lo cual existen tres posibilidades:

- Puede depositarse formando un cordón, en cuyo caso la carga de la Mezcladora-Extendedora se hace mediante un equipo ad hoc: cargadora de cadenas o de cangilones.
- Puede cargarse sobre camión y éste se encarga de depositar el material en la tolva de la Mezcladora-Extendedora. En este caso puede tratarse la superficie (limpieza y adherencia o imprimación) previamente a la extensión.
- Puede depositarse sobre la tolva de la Fresadora-Extendedora mediante una cinta transportadora convencional.

Fresadora-Mezcladora + Extendedora

Esta configuración difiere de las anteriores en que se prescinde de la mezcladora como elemento independiente. El mezclado se realiza simultáneamente al fresado. La idea que inspira estos equipos de Fresadora-Extendedora es la de aprovechar la energía del fresado para obtener la mezcla dentro de la campana o carcasa de la fresadora. Para ello se dispone una rampa que inyecta la emulsión dentro de la cámara de fresado. Existen numerosos equipos de este tipo y prácticamente todos los grandes fabricantes de fresadoras disponen de equipos de fresadora-mezcladora derivados de sus fresadoras convencionales. El suministro de emulsión se realiza a través de una tubería flexible desde una cisterna que se solidariza con la fresadora-mezcladora por una barra rígida. La inyección de emulsión se regula mediante una bomba de caudal variable y se controla con contadores o caudalímetros, además se dispone generalmente de un sistema de retorno. Cuando se necesita incorporar agua, además de la emulsión, la mejor solución es disponer una segunda rampa de inyectores duplicando el sistema de impulsión y control. Como alternativa puede realizarse una

conexión de las mangueras de emulsión y agua regulando el caudal de ambas bombas de forma que la proporción sea constante.

La incorporación de áridos para corrección granulométrica o de aditivos, tipo cal o cemento, se realiza extendiéndolos sobre la superficie a reciclar antes del paso de la Fresadora-Mezcladora.

Algunos equipos permiten la dosificación de los aditivos pulverulentos en forma de lechada lo que elimina contaminaciones a áreas colindantes y problemas cuando hay viento y proporciona una mejor dosificación.

En este tipo de configuración el extendido se realiza mediante una Extendedora independiente para lo cual el material fresado y mezclado se suele dejar sobre el firme formando un cordón. Debe tenerse en cuenta el efecto desecación para ajustar correctamente la humedad en el mezclado. Existe también la posibilidad de enviar el material mezclado a un camión o directamente a la tolva de la Extendedora mediante la cinta cargadora de la fresadora. Esta opción no es muy recomendable por la facilidad con el material tratado con emulsión se adhiere a la cinta lo que acarrea problemas de segregación además de acortar la vida de la propia cinta elevadora.

Fresadora-Mezcladora-Extendedora

Como variante o mejora de la configuración anterior han surgido equipos que integran en una sola máquina las funciones de fresado, mezclado y extendido. En algún caso el mezclado es independiente del fresado y se realiza mediante una mezcladora de eje transversal que se ubica inmediatamente detrás de la fresadora. Esta última configuración es la que más se está utilizando en España, con muy buenos resultados. Existen numerosos fabricantes que continuamente desarrollan e innovan para crear equipos cada vez más específicos para el desarrollo de esta tecnología. A continuación se definen tres de los más utilizados en este país de la empresa Wirtgen (2010).

2.15.3.2. EQUIPOS DE COMPACTACIÓN

La compactación es una operación siempre delicada. La temperatura del material extendido no siempre coincide con la óptima de compactación, si fuera menor, no es apta para su aplicación, o si fuera excesiva puede que haya que esperar algún tiempo a que se seque el material.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que, debido a la menor densidad del material una vez reciclado, la superficie del material compactado va a quedar por encima de la rasante original, del orden de un 10% del espesor reciclado, por lo que hay que aplicar una compactación fuerte.

El tren de compactación para una capa reciclada suele estar formado por:

- Un rodillo vibratorio pesado, el cual hace que el material extendido y refinado termine por encajarse en el hueco abierto por el fresado,
- Un rodillo de neumáticos también pesado que, con baja presión de inflado, compacta el fondo de la capa reciclada y, con alta presión, ayuda a la eliminación del agua (cuando el reciclado es con emulsión asfáltica) y cierra la superficie.

CAPÍTULO III

RECICLADO DE CARPETA ASFÁLTICA EN PLANTA EN CALIENTE POR EL MÉTODO MARSHALL

3.1. INTRODUCCIÓN

El reciclado en planta en caliente, es un proceso por el cual se combinan materiales recuperados de un pavimento asfáltico y eventualmente de la base granular, con cemento asfálticos, como el caso del Betún y agregados nuevos, según las necesidades en una planta central, para producir mezclas para pavimentación en caliente. El producto terminado deberá cumplir las especificaciones y requisitos constructivos para el tipo de mezcla producida.

3.2. SELECCIÓN DE MATERIALES

3.2.1. Carpeta Asfáltica a Reciclar

Para la obtención de la carpeta asfáltica a reciclar de la avenida La Paz, se procedió a levantar la carpeta en trozos o bloques a partir de la escarificación que realizó la Alcaldía del Municipio de Tarija, para bachear las zonas dañadas.

Se hizo levantamiento de las muestras en tres puntos, en distintas fechas, como se muestra a continuación:

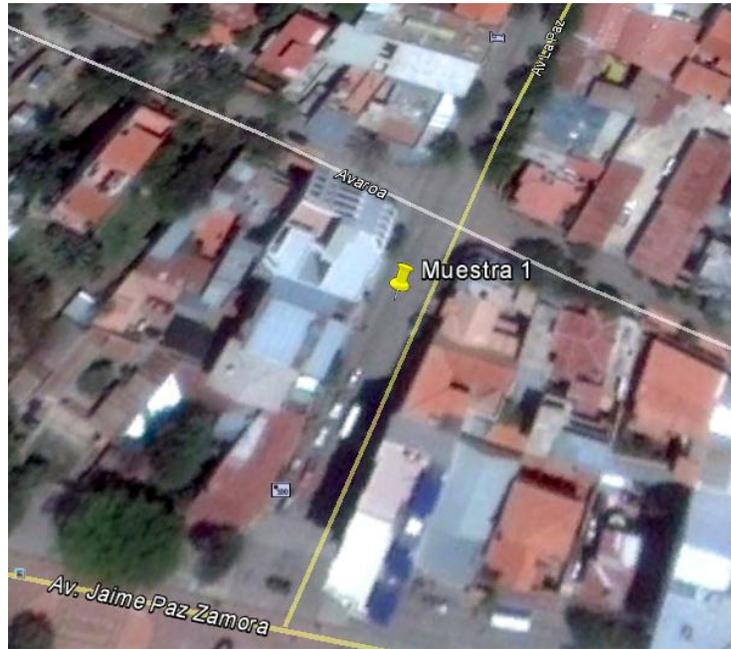
MUESTRA	UBICACIÓN	FECHA DE EXTRACCIÓN
1	Avenida La Paz entre avenida Jaime Paz Zamora y calle Avaroa.	27 de Marzo del 2015
2	Avenida La Paz entre calle La Madrid y avenida Belgrano.	31 de Marzo del 2015
3	Avenida La Paz entre calles Oruro y Bolívar.	13 de Abril del 2015

Imagen 3.1: Croquis de Ubicación del muestreo



Fuente: Google Earth.

Imagen 3.2: Muestra 1, Av. La Paz entre Av. Jaime Paz y Calle Avaroa



Fuente: Google Earth.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.3: Muestra 2, Av. La Paz entre calle La Madrid y Av. Belgrano



Fuente: Google Earth.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.4: Muestra 3, Av. La Paz entre calle Oruro y Bolívar



Fuente: Google Earth.



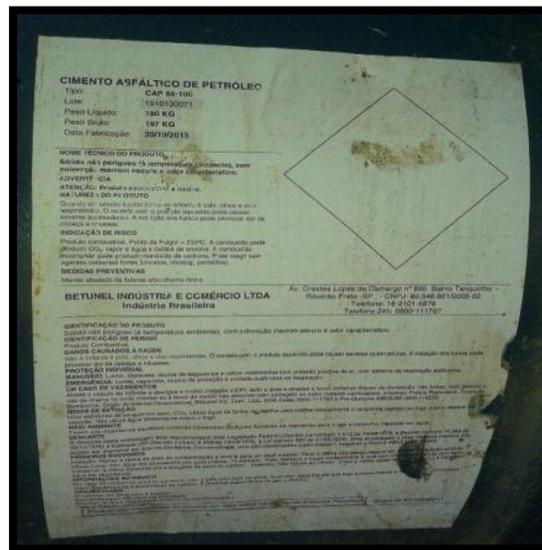
Fuente: Elaboración Propia

3.2.2. Materiales de Aporte

Los materiales 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; Además de tener una disponibilidad.

El material pétreo, está situado en la comunidad de San Mateo, donde se encuentra ubicada una chancadora para la provisión de material para la Alcaldía del Municipio de Tarija de la Provincia Cercado, y el Betún como ligante asfáltico C.A. 85-100 con nombre Betunel de procedencia Brasileira, también proporcionado por la misma institución; siendo los mismos analizados en laboratorio de Suelos, Hormigones y Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Imagen 3.5: Especificaciones del Betún Nuevo de Aporte



Fuente: Elaboración Propia

3.3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

3.3.1. Material a Reciclar

3.3.1.1. Agregados a Reciclar

3.3.1.1.1. Extracción Centrífuga

En este ensayo se procede a la extracción de los agregados pétreos de la carpeta asfáltica a reciclar, a través del extractor centrífugo que consiste en realizar un lavado de la carpeta asfáltica a reciclar con gasolina, de donde se extrae el todo el

agregado pétreo que conformaba dicha carpeta. También con este ensayo se determina el contenido de cemento asfáltico, haciendo una relación de pesos, antes y después del ensayo.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.6: Lavado de la carpeta asfáltica a reciclar



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.7: Obtención del peso antes de llevar al horno para su desintegración



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.8: Colocado de la carpeta desintegrada dentro del extractor centrífugo



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.9: Agregado Reciclado sin ligante



Fuente: Elaboración Propia

3.3.1.1.2. Granulometría

Se procedió a realizar el análisis granulométrico por el método de la vía seca, porque fue lavado con gasolina en el extractor centrífugo previamente.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.10: Lavado de la muestra para granulometría



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.11: Juego de tamices para granulometría



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.12: Obtención de pesos retenidos en cada tamiz



Fuente: Elaboración Propia

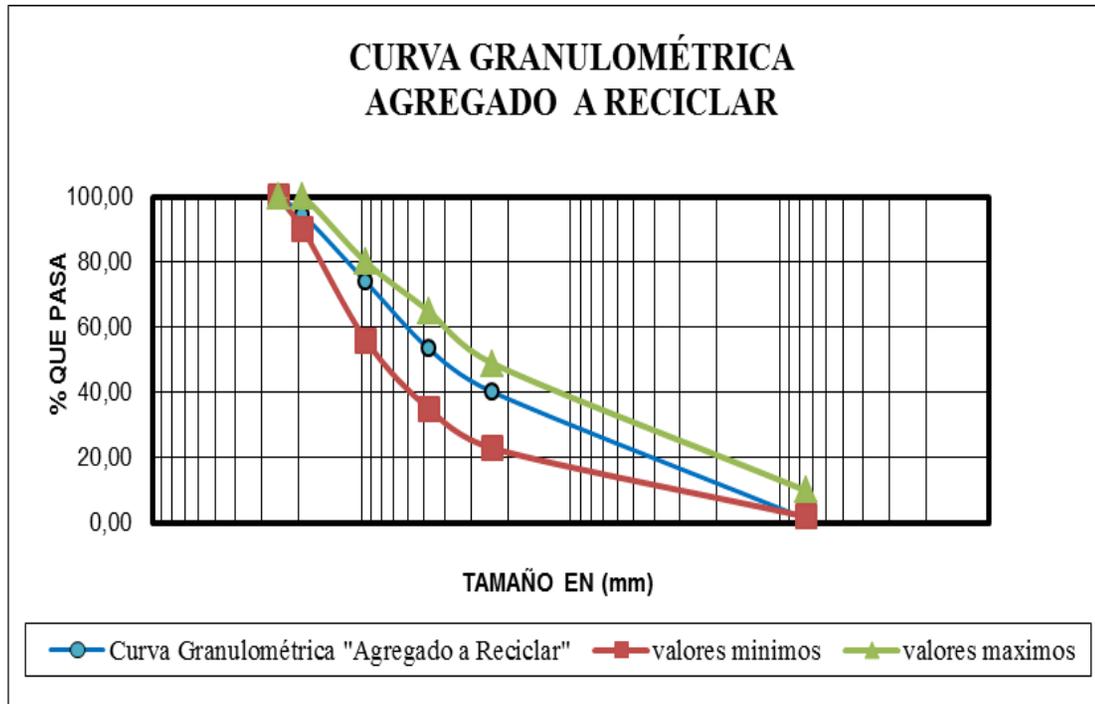
RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.1: Granulometría del Agregado a Reciclar

Peso Total (gr.)			2375,3		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	126,90	126,90	5,34	94,66
1/2"	12,5	304,30	431,20	18,15	81,85
3/8"	9,50	186,80	618,00	26,02	73,98
Nº4	4,75	488,20	1106,20	46,57	53,43
Nº8	2,36	313,60	1419,80	59,77	40,23
Nº16	1,18	229,50	1649,30	69,44	30,56
Nº30	0,60	197,80	1847,10	77,76	22,24
Nº50	0,30	219,90	2067,00	87,02	12,98
Nº100	0,15	180,20	2247,20	94,61	5,39
Nº200	0,075	96,10	2343,30	98,65	1,35
BASE	-	30,90	2374,20	99,95	0,05
SUMA		2374,2			
PÉRDIDAS		1,1			

Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.1: Curva Granulométrica del agregado a reciclar



Fuente: Elaboración Propia

3.3.1.1.3. Peso Específico del Agregado Grueso

El peso específico de una sustancia es la proporción peso-volumen de una unidad de esta sustancia comparada con la proporción peso-volumen de una unidad igual de agua. El peso específico de una muestra de agregado es determinado al comparar el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, a la misma temperatura. El peso específico del agregado se expresa en múltiplos peso específico del agua (la cual siempre tiene un valor de 1).

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.13: Lavado del material retenido en el tamiz N°4



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.14: Muestra sumergida en agua por 24 hrs.



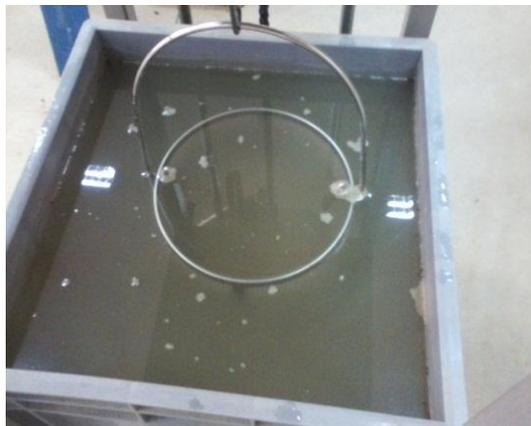
Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.15: Secado superficial de la muestra saturada.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.16: Determinación del peso sumergido



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.2: Tabla de resultados de Peso Específico del Agregado Grueso

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
1	2505,90	2517,30	1628,00	2,82	2,83	2,85	0,45
2	2499,70	2513,20	1625,00	2,81	2,83	2,86	0,54
3	2501,40	2515,80	1621,00	2,80	2,81	2,84	0,58
			Promedio	2,81	2,82	2,85	0,52

Fuente: Elaboración Propia

3.3.1.1.4. Peso Específico del Agregado Fino

El cálculo del peso específico de la muestra seca de agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones agregadas, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.17: Lavado del material que pasa por el tamiz N°4



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.18: Muestra sumergida en agua por 24 hrs.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.19: Secado superficial con secadora.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.20: Verificación la condición muestra saturada con superficie seca



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.21: Determinación del peso específico



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.3: Tabla de resultados de Peso Específico del Agregado Fino

MUESTRA Nº	PESO MUESTRA (gr)	PESO DE MATRÁZ (gr)	MUESTRA + MATRAZ + AGUA (gr)	PESO DEL AGUA AGREGADO AL MATRÁZ "W" (ml) ó (gr)	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	VOLUMEN DEL MATRÁZ "V" (ml)	P. E. A GRANEL (gr/cm ³)	P. E. SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm ³)	P. E. APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
1	500	173,7	999,2	325,50	497,50	500,00	2,85	2,87	2,89	0,50
2	500	173,7	1000,5	326,80	498,70	500,00	2,88	2,89	2,90	0,26
3	500	173,7	998,1	324,40	496,20	500,00	2,83	2,85	2,89	0,76
Promedio							2,85	2,87	2,89	0,51

Fuente: Elaboración Propia

3.3.1.2. Betún a Reciclar

3.3.1.2.1. Contenido de Betún

El contenido de Betún se obtiene a partir de la diferencia del peso antes de someterlo al extractor centrífugo y del peso del agregado después del ensayo.

Imagen 3.22: Material bituminoso luego del lavado con kerosene.



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.4: Tabla de resultados de Contenido de Asfalto

N° MUESTRA	PESO DE LA MUESTRA ANTES DEL CENTRIFUGADO	PESO DEL AGREGADO DESPUÉS DEL CENTRIFUGADO	PESO DEL LIGANTE ASFÁLTICO	% CONTENIDO ASFÁLTICO
1	1500,5	1442,03	58,47	3,90
2	1000,6	959,92	40,68	4,07
3	1200,2	1150,27	49,93	4,16
			PROMEDIO	4,04

Fuente: Elaboración Propia

3.3.1.2.2. Penetración

En este ensayo sólo se trabajó con una muestra, debido a que se contaba con poco material bituminoso, después de la extracción.

Imagen 3.22: Ensayo de penetración.



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.5: Tabla de resultados del ensayo de Penetración

ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ESPECIFICACIONES	
				Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	mm	217		
	Lectura N°2		221		
	Lectura N°3		205		
	Promedio		214		

Fuente: Elaboración Propia

3.3.1.2.3. Viscosidad

La determinación de la viscosidad se lo realizó con el viscosímetro de brazos cruzados, con el cual se obtiene la viscosidad cinemática.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.23: Ensayo de viscosidad a una temperatura de 135°C



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.6: Tabla de resultados del ensayo de Viscosidad

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ESPECIFICACIONES	
			Mínimo	Máximo
Viscosidad Cinemática 135 °C	mm ² /s	247	250	-

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2. Material de Aportación

3.3.2.1. Agregados Nuevos

3.3.2.1.1. Granulometría

Se procedió a realizar el análisis granulométrico por el método de la vía húmeda, porque los agregados tenían material fino.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.24: Lavado del material grueso



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.25: Tamizado manual por la serie de tamices.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.26: Obtención de los pesos retenidos en cada tamiz.



Fuente: Elaboración Propia

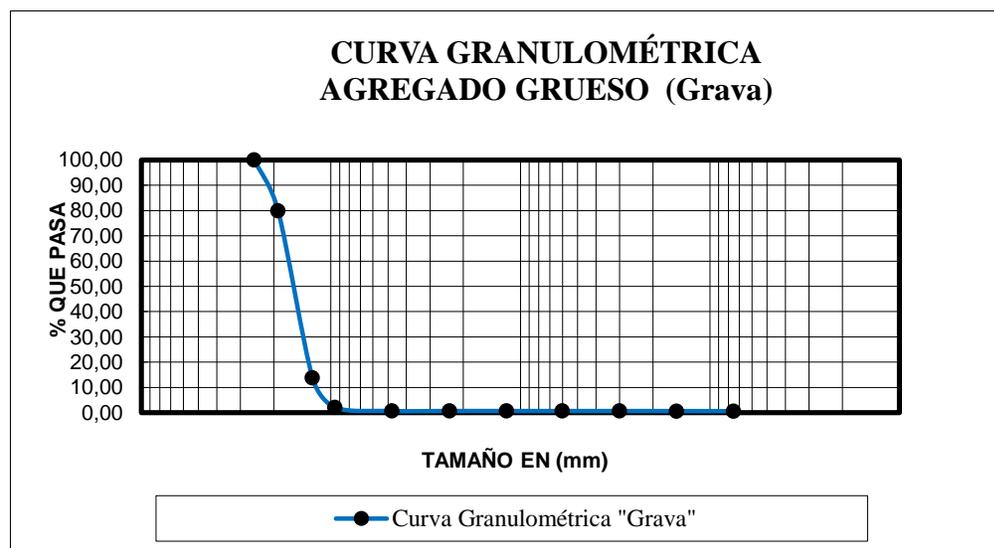
RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.7: Tabla de resultados de lo granulometría del agregado grueso (Grava)

Peso Total (gr.)			5000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	1004,30	1004,30	20,09	79,91
1/2"	12,5	3306,40	4310,70	86,21	13,79
3/8"	9,50	583,40	4894,10	97,88	2,12
Nº4	4,75	70,50	4964,60	99,29	0,71
Nº8	2,36	0,10	4964,70	99,29	0,71
Nº16	1,18	0,50	4965,20	99,30	0,70
Nº30	0,60	0,30	4965,50	99,31	0,69
Nº50	0,30	0,20	4965,70	99,31	0,69
Nº100	0,15	0,70	4966,40	99,33	0,67
Nº200	0,075	1,80	4968,20	99,36	0,64
BASE	-	30,90	4999,10	99,98	0,02
SUMA		4999,1			
PÉRDIDAS		0,9			

Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.2: Curva Granulométrica del agregado grueso (Grava)



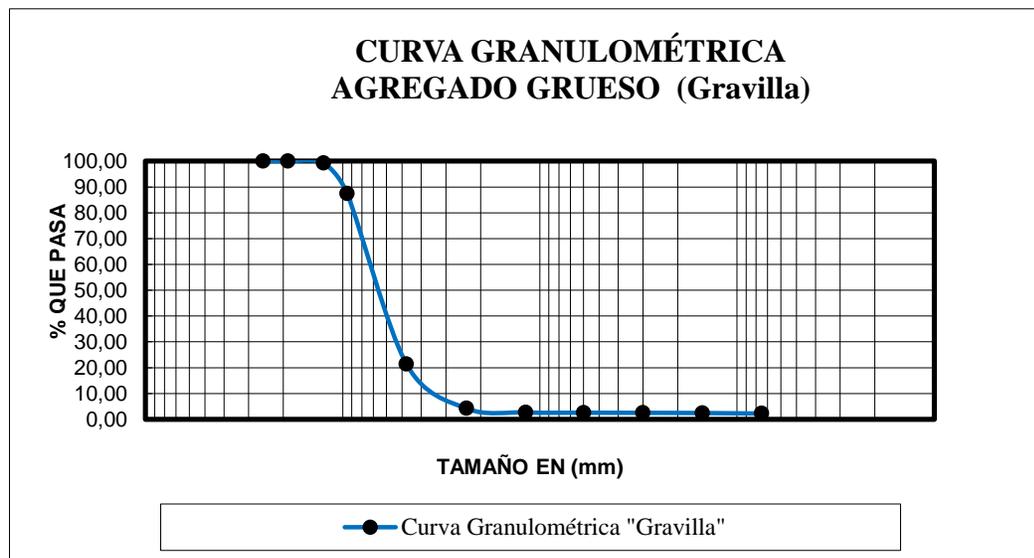
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.8: Tabla de resultados de lo granulometría del agregado grueso (Gravilla)

Peso Total (gr.)			5000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	40,60	40,60	0,81	99,19
3/8"	9,50	587,10	627,70	12,55	87,45
Nº4	4,75	3302,40	3930,10	78,60	21,40
Nº8	2,36	859,50	4789,60	95,79	4,21
Nº16	1,18	77,80	4867,40	97,35	2,65
Nº30	0,60	5,60	4873,00	97,46	2,54
Nº50	0,30	2,10	4875,10	97,50	2,50
Nº100	0,15	3,90	4879,00	97,58	2,42
Nº200	0,075	9,90	4888,90	97,78	2,22
BASE	-	109,70	4998,60	99,97	0,03
SUMA		4998,6			
PÉRDIDAS		1,4			

Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.3: Curva Granulométrica del agregado grueso (Gravilla)



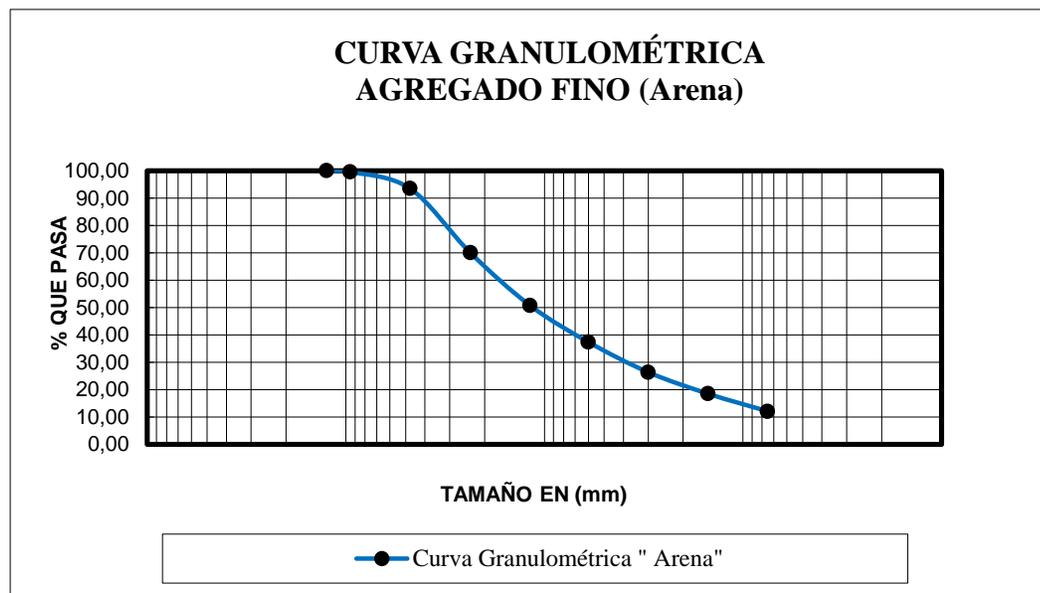
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.9: Tabla de resultados de la granulometría del agregado fino (Arena)

Peso Total (gr.)			3000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1/2	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	13,00	13,00	0,43	99,57
Nº4	4,75	181,70	194,70	6,49	93,51
Nº8	2,36	705,80	900,50	30,02	69,98
Nº16	1,18	577,70	1478,20	49,27	50,73
Nº30	0,60	401,50	1879,70	62,66	37,34
Nº50	0,30	330,00	2209,70	73,66	26,34
Nº100	0,15	235,90	2445,60	81,52	18,48
Nº200	0,075	193,00	2638,60	87,95	12,05
BASE	-	360,20	2998,80	99,96	0,04
SUMA		2998,8			
PÉRDIDAS		1,2			

Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.4: Curva Granulométrica del agregado fino (Arena)



Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.1.2. Peso Específico del Agregado Fino

El cálculo del peso específico de la muestra seca de agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones agregadas, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.27: Lavado del material que pasa por el tamiz N°4



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.28: Muestra sumergida en agua por 24 hrs.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.29: Secado superficial con secadora.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.30: Verificación de la condición muestra saturada con superficie seca.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.31: Vertido de la muestra al matraz.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.32: Peso de la muestra más agua.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.33: Obtención del peso de la muestra seca.



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.10: Tabla de resultados del peso específico del agregado fino (Arena)

MUESTRA N°	PESO MUESTRA (gr)	PESO DE MATRÁZ (gr)	MUESTRA + MATRÁZ + AGUA (gr)	PESO DEL AGUA AGREGADO AL MATRÁZ "W" (ml) ó (gr)	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	VOLUMEN DEL MATRÁZ "V" (ml)	P. E. A GRAN EL (gr/cm ³)	P. E. SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm ³)	P. E. APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
1	500	177,4	989,2	311,80	494,50	500,00	2,63	2,66	2,71	1,10
2	500	177,4	988,3	310,90	498,20	500,00	2,63	2,64	2,66	0,36
3	500	177,4	987,4	310,00	498,10	500,00	2,62	2,63	2,65	0,38
PROMEDIO							2,63	2,64	2,67	0,61

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.1.3. Peso Específico del Agregado Grueso (Gravilla)

Se realizó el ensayo con tres muestras, cada una de 5 Kg, se siguieron los pasos como se muestra a continuación:

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.34: Pesaje del material retenido en el tamiz N° 4



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.35: Secado superficial de la muestra saturada 24 hrs antes.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.36: Obtención del peso sumergido.



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.11: Tabla de resultados del peso específico del agregado grueso (Gravilla)

MUESTRA Nº	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
1	4935,90	5051,70	3043,00	2,46	2,51	2,61	2,35
2	4930,10	5046,20	3041,00	2,46	2,52	2,61	2,35
3	4928,50	5046,10	3040,00	2,46	2,52	2,61	2,39
PROMEDIO				2,46	2,52	2,61	2,36

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.1.4. Peso Específico del Agregado Grueso (Grava)

Se realizó el ensayo con tres muestras, cada una de 5 Kg, se siguieron los pasos como se muestra a continuación:

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.37: Pesaje del material retenido en el tamiz N°4



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.38: Secado superficial de la muestra saturada en agua.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.39: Obtención del peso sumergido en agua.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.40: Secado de la muestra en el horno.



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.12: Tabla de resultados del peso específico del agregado grueso (Grava)

MUESTRA Nº	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
1	4964,30	5046,20	3050,00	2,49	2,53	2,59	1,65
2	4570,80	4648,40	2797,00	2,47	2,51	2,58	1,70
3	4972,20	5045,30	3047,00	2,49	2,52	2,58	1,47
PROMEDIO				2,48	2,52	2,58	1,61

Fuente: Elaboración Propia

3.3.1.1.5. Desgaste de Los Ángeles

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.

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO:

Tabla 3.13: Tabla de pesos del agregado grueso y N° de esferas para el Desgaste de los Ángeles.

GRADACIÓN		A	B	C	D
DIAMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR (gr)			
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
PESO TOTAL		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
NUMERO DE ESFERAS		12	11	8	6
N° DE REVOLUCIONES		500	500	500	500
TIEMPO DE ROTACION		30	15	15	15

Fuente: Norma ASTM, C131.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.41: Colocado de la muestra en la máquina de los ángeles con el N° de esferas correspondiente.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.42: Muestra después del ensayo en la máquina de los ángeles.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.43: Pesaje de la muestra retenida en el tamiz N°12, después del lavado y secado en el horno.



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.14: Tabla de datos del Desgaste de los Ángeles

DATOS DE LABORATORIO							
GRADACIÓN A		GRADACIÓN B		GRADACIÓN C		GRADACIÓN D	
TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO	TAMIZ	PESO RETENIDO
1"	-	1/2"	-	1/4"	-	N°8	-
3/4"	1251,5	3/8"	-	N°4	-		
1/2"	1251,3						
3/8"	1251,8						

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.15: Tabla de resultados del Desgaste de los Ángeles

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ASTM
A	3754,6	2698,4	28,13	35% MAX
B	-	-	-	35% MAX
C	-	-	-	35% MAX
D	-	-	-	35% MAX

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.1.6. Equivalente de Arena

Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm). El término “Equivalente de Arena” transmite el concepto que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezcla de partículas gruesas, arenas y generalmente finos.

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución en una probeta plástica graduada que luego de ser agitada separa el recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un período de tiempo, se pueden leer las alturas de arcilla y arena en la probeta. El equivalente de arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

Este método proporciona una manera rápida de campo para determinar cambios en la calidad de agregados durante la producción o colocación.

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO:

Imagen 3.44: Pesaje de la muestra sin lavar y vertido de la solución.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.45: Colocado de la muestra dentro de la probeta.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.46: Agitado de la muestra con la solución.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.47: Muestra en reposo por 20 min.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.48: Obtención de las lecturas H_1 y H_2



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.16: Tabla de datos y resultados de Equivalente de Arena

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	9,9	10,60	93,40
2	11,3	12,15	93,00
3	10,8	11,70	92,31
Promedio			92,90

Equivalente de Arena (%)	NORMA
92,90	> 50%

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.2. Betún Nuevo

3.3.2.2.1. Penetración

Este método de ensayo cubre la determinación de la penetración de materiales bituminosos semi-sólido y sólidos. Los materiales que tienen penetraciones debajo de 350 pueden ser probados por el aparato normal y con el siguiente procedimiento. Para materiales que tienen penetraciones entre 350 y 500, se debe usar un aparato especial.

La penetración de un material bituminoso es la distancia en décimas de milímetro que una aguja normalizada penetra verticalmente bajo las condiciones fijas de temperatura, carga y tiempo.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:*Imagen 3.49: Colocado del betún en taras**Fuente: Elaboración Propia**Imagen 3.50: Muestras en baño María de 25°C.**Fuente: Elaboración Propia**Imagen 3.51: Realización del ensayo de penetración.**Fuente: Elaboración Propia*

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.17: Tabla de datos y resultados del ensayo de Penetración

ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	mm	92	94	98	95	85	100
	Lectura N°2		97	93	95			
	Lectura N°3		91	99	92			
	Promedio		93	95	95			

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.2.2. Viscosidad

Este método cubre los procedimientos empíricos para determinar la viscosidad cinemática de productos de petróleo a temperaturas especificadas de 135°C. Un procedimiento especial para los productos cerosos es incluido.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.52: Calentado del aceite y colocado del viscosímetro con el material bituminoso.



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.18: Tabla de datos y resultados del ensayo de Viscosidad.

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Viscosidad Cinemática 135 °C	mm ² /s	325	297	318	313	250	-

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.2.3. Ductilidad

La ductilidad de un material bituminoso es medida por la distancia en centímetros a la cual se alargará antes de romper cuando se tiran dos extremos de un espécimen de la briqueta del material, estos extremos son separados a una velocidad especificada y a una temperatura especificada. A menos que por otra parte se especifique, el ensayo se hará a una temperatura de $25 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ($77 \pm 0.2^{\circ}\text{F}$) y con una velocidad de 50 mm por minuto ± 2.5 mm por minuto. A otras temperaturas la velocidad debe especificarse.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.53: Colocado de la muestra en moldes



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.54: Colocado de las muestras al ductilímetro



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.55: Muestra en ensayo de ductilidad



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.19: Tabla de datos y resultados del ensayo de Ductilidad.

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	44,0	47,0	43,0	45	42	53

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.2.4. Punto de Inflamación

Este método cubre la determinación del punto de inflamación, por el Ensayo del Vaso Abierto de Cleveland, de productos de petróleo y otros líquidos, excepto los aceites de combustible y esos materiales que tienen un punto de inflamación de vaso abierto debajo de 79°C (175°F).

Punto de destello

Es la temperatura más baja corregida a una presión barométrica de 101.3 kPa, a la aplicación del fuego (llama) causa el vapor de un espécimen para encender bajo las condiciones especificadas del ensayo.

Punto de inflamación

Es la temperatura más baja a la que un espécimen se mantendrá quemándose durante 5 segundos.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.56: Muestra en la copa de Cleveland



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.57: Muestra en ensayo pasando la llame de fuego.



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.20: Tabla de datos y resultados del ensayo de Punto de Inflamación

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	>280	>290	>295	>288	>232	-

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.2.5. Punto de Ablandamiento

Este método de ensayo cubre la determinación del punto de ablandamiento de betún en el rango de 30 a 157°C (86 a 315°F) usando el aparato de la anillo-y-esfera sumergido en agua destilada, glicerina USP o glicol del etileno.

Dos discos horizontales de betún, fundidos en anillos de latón de apoyo, están acalorando a una proporción controlada en un baño líquido mientras soportan una esfera de acero. El punto de ablandamiento se informa como las pobres de las temperaturas a las cuales los dos discos se ablandan suficiente para permitir cada esfera, envolvió en betún, se caiga una distancia de 25 mm (1.0 in.).

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.58: Muestra en molde para punto de Ablandamiento



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.59: Muestra en baño de 5°C por media hora.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.60: Muestra sobre calor



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.61: Muestra en ensayo, hasta la caída de las esferas



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.21: Tabla de datos y resultados del ensayo de Punto de Ablandamiento.

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	44,0	47,0	43,0	45	42	53

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2.2.6. Peso específico

La gravedad específica de materiales bituminosos semi-sólidos, cementos del asfalto, y los alquitranes suaves se expresarán como la relación de la masa de un volumen dado del material a 25°C (77°F) o a 15.6°C (60°F) al que es igual de un volumen de agua a la misma temperatura.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:*Imagen 3.62: Peso de los picnómetros vacíos*

Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.63: Peso de los picnómetros calibrados con agua.

Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.64: Picnómetros con muestra

Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.65: Llenado con agua a picnómetros con muestra



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.66: Peso de muestras con previo baño María a 25°C



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA:

Tabla 3.22: Tabla de datos y resultados del ensayo de Peso Específico.

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
						Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro	gr	38,0	36,9	38,0			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	gr	62,7	62,0	62,7			
Peso Picnómetro + Muestra	gr	55,8	56,5	56,2			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	gr	62,8	62,3	62,9			
Peso Específico	gr/cm ³	1,003	1,013	1,008	1,008	1	1,05

Fuente: Elaboración Propia

3.4. DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA POR EL MÉTODO MARSHALL

El siguiente procedimiento será aplicado solamente a mezclas asfálticas en caliente, preparadas con cemento asfáltico y agregados no mayores de 2.54 cm (1 pulg.), el diámetro del molde Marshall será de 101.6 mm (4 pulg.). Cuando el tamaño de la partícula excede los 2.5 cm (1 pulg.) se emplean moldes de 152.4 mm (6 pulg.), este procedimiento no es aplicable a ese tipo de muestras.

1. *Molde de Compactación.* Consiste de una placa de base plana, molde y collar de extensión cilíndricos. El molde tiene un diámetro interior de 101.6 mm (4") y altura aproximada de 76.2 mm (3"); la placa de base plana y el collar deben ser intercambiables.

2. *Martillo de compactación* con base plana circular de apisonado de 98.4 mm (3 7/8") de diámetro, equipado con un pisón de 4.54 kg (10 lb.) de peso total, cuya altura de caída es de 457.2 mm (18").

3. *Extractor de Muestras de Asfaltos.* Para extraer el espécimen del molde, en forma de disco con diámetro de 100 mm (3.95") y 12.7 mm (1/2") de espesor.

4. *Soporte para molde o porta molde.* Dispositivo con resorte de tensión diseñado para sostener rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal.

5. *Mordaza.* Consiste de dos semi-cilindros, con un radio de curvatura interior de 50.8 mm (2") de acero enchapado para facilitar su fácil limpieza. El segmento inferior termina en una base plana con dos varillas perpendiculares que sirven de guía.

6. *Medidor de deformación.* Consiste en un deformímetro dividido en centésimas de milímetro. Estará sujeto al segmento superior y cuyo vástago se apoyará, cuando se realiza el ensayo, en una palanca ajustable acoplada al segmento inferior. Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0.001 mm.

7. *Prensa.* Para llevar a la falla a la muestra, será mecánica con una velocidad uniforme de 50.8 mm/min.

8. *Medidor de Estabilidad.* La resistencia de la probeta en el ensayo se medirá con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa, de 20 kN (2039 kgf) de capacidad, con una sensibilidad de 50 N (5 kgf) hasta 5 kN (510 kgf) y 100 N (10 kgf) hasta 20 kN (2 039 kgf). Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0.001 mm.

9. *Discos de Papel Filtrante de 4 pulg.*

10. *Horno.* 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.

11. *Baño.* El baño de agua con 150mm (6") de profundidad mínima y controlado termostáticamente para mantener la temperatura a $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$ ($140^{\circ} \pm 1.8^{\circ} \text{F}$), deberá tener un falso fondo perforado o estar equipado con un estante para mantener las probetas por lo menos a 50.8 mm (2") sobre el fondo del tanque.

12. *2 Recipientes* de dos litros de capacidad para calentar los agregados y para mezclar el asfalto y agregado.

13. *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).

14. *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).

15. *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.

3.4.1. MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA AL 100%

En este caso, se optó por el reciclado al 100%, que consiste en calentar la carpeta asfáltica a reciclar hasta que se desintegre y forme una mezcla similar a la convencional, para luego adicionar los distintos porcentajes de Betún, del 0.5 al 2.5 %, haciendo un total de 5 porcentajes que estarán en análisis. La temperatura del mezclado será de 140 °C, con ese grado de calor deben realizarse las briquetas, que serán un total de 6 briquetas por porcentaje en estudio.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.67: Calentado de la Muestra Asfáltica a Reciclar



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.68: Pesaje y Vertido del Betún adicional a la mezcla reciclada 100%



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.69: Mezclado constante hasta alcanzar la temperatura deseada.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.70: Elaboración de Briquetas por el Método Marshall.



Fuente: Elaboración Propia

Verter la mezcla en los moldes Marshall, en tres capas, las dos primeras con 25 varillasos para el acomodo y la tercera con 75 golpes con el martillo; dar la vuelta de cara y aplicar otros 75 golpes.

Imagen 3.71: Compactación de Briquetas con martillo Marshall



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.72: Muestra reposando por 2 hrs, para luego desmoldar con un extractor de núcleos.



Fuente: Elaboración Propia

3.4.2. MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA CON AGREGADOS NUEVOS

En este caso, se optó por el reciclado adicionando agregados pétreos para perfeccionar la curva granulométrica de la carpeta asfáltica a reciclar, quedando en los siguientes porcentajes, Agregado a reciclar con el 60.8% y agregado nuevo adicional con el 39.2 %. El procedimiento es similar al anterior que consiste en calentar la carpeta asfáltica a reciclar hasta que se desintegre y forme una mezcla similar a la convencional, para luego adicionar los distintos porcentajes de Betún, del 0.5 al 2.5 %, haciendo un total de 5 porcentajes que estarán en análisis. La temperatura del mezclado será de 140 °C, con ese grado de calor deben realizarse las briquetas, que serán un total de 6 briquetas por porcentaje en estudio.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Imagen 3.73: Separación los agregados por tamaño para armar la granulometría.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.74: Agregados listos para adicionar a la mezcla bituminosa.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.75: Preparación de la Mezcla Bituminosa nueva



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.76: Adición de la carpeta asfáltica a reciclar previamente calentada y aumentar el porcentaje de Betún adicional según corresponda.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.77: Elaboración de Briquetas



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.78: Compactación con martillo con 75 golpes por cara.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.79: Desmoldado de briquetas después de un reposo mínimo de 2 hrs.



Fuente: Elaboración Propia

3.4.3. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, ESTABILIDAD Y FLUENCIA MARSHALL

Previo a los ensayos Marshall, se debe determinar la altura de las briquetas para un factor de corrección que se aplica cuando no cumple con lo establecido en la norma. Se hizo la lectura de tres alturas para promediar, ya que las briquetas no tienen una altura pareja, por desvío del martillo compactador al realizarlo manualmente.

3.4.3.1 Determinación de la Densidad

Imagen 3.80: Pesaje de cada briketa en su estado seco al aire libre.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.81: Briketas en Baño María a 25°C por 5 min.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.82: Pesaje de briquetas saturadas con superficie seca.



Fuente: Elaboración Propia

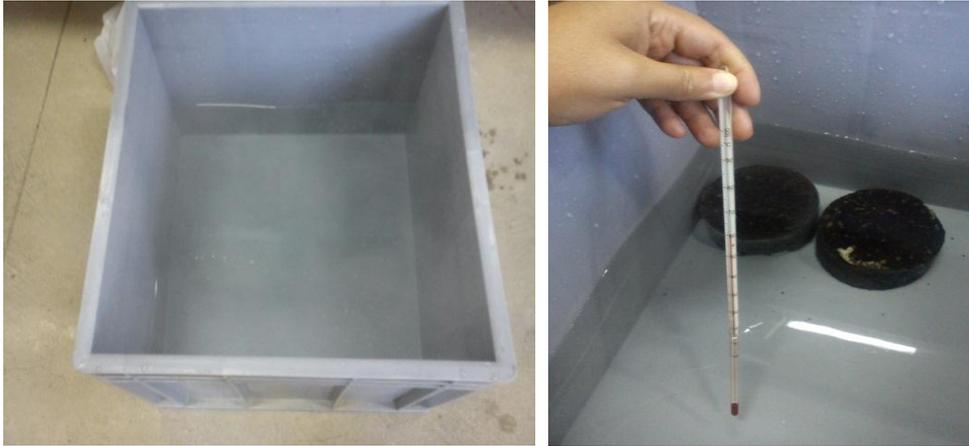
Imagen 3.83: Determinación del peso sumergido en el agua.



Fuente: Elaboración Propia

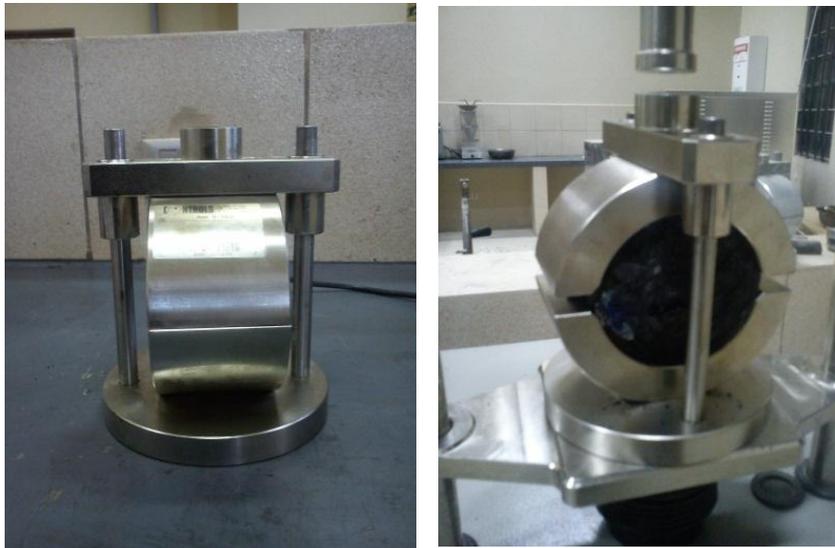
3.4.3.2. Determinación de la Estabilidad y Fluencia

Imagen 3.84: Briquetas en baño María a 60°C por 35 min para cada una



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.85: Colocado de briquetas en la mordaza Marshall



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.86: Lectura del dial de Estabilidad (dentro del anillo Marshall) y el dial de deformación para el Flujo.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.87: Briqueta ensayada (rota)



Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DE LA PRÁCTICA PARA MUESTRA RECICLADA AL 100%

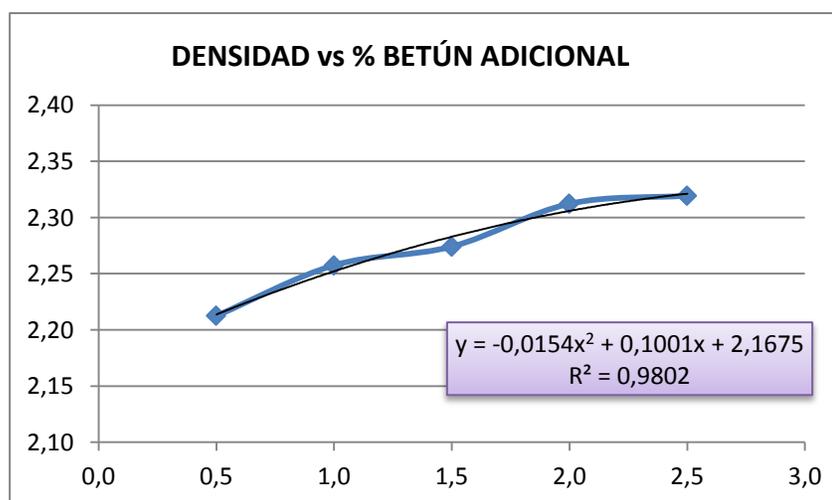
Tabla 3.23: Tabla de resultados del ensayo Marshall para muestra reciclada al 100%.

PORCENTAJE DE BETÚN ADICIONAL	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	ESTABILIDAD (libras)	FLUJO	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
0,5	2,21	6273,79	6,92	16,48	37,69	26,44
1,0	2,26	6328,84	8,23	14,05	44,54	25,34
1,5	2,27	6334,63	8,53	12,69	49,63	25,19
2,0	2,31	6763,71	8,76	10,48	56,94	24,33
2,5	2,32	6879,08	9,12	9,45	61,42	24,50

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.1: Curva Densidad vs. % Betún Adicional

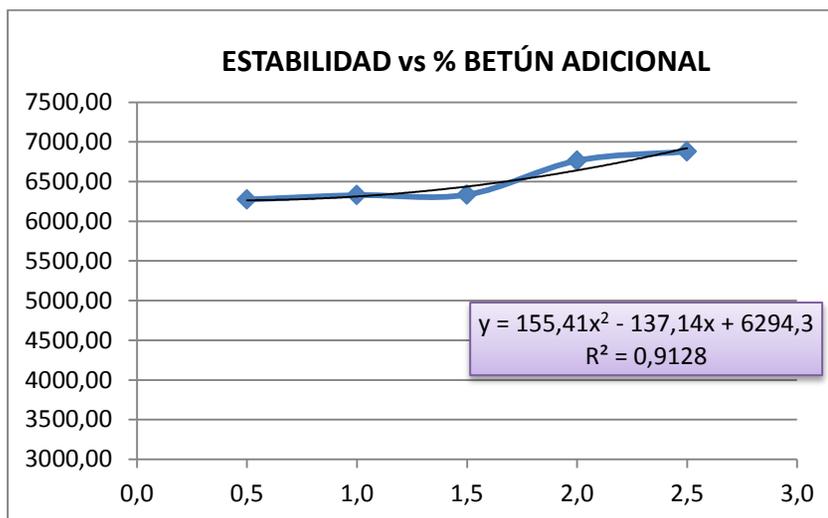
(Reciclado al 100%)



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.2: Curva Estabilidad vs. % Betún Adicional

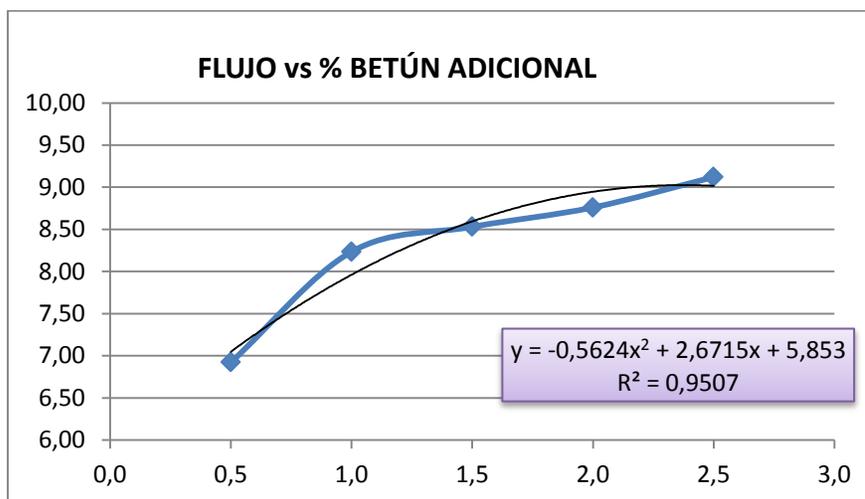
(Reciclado al 100%)



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.3: Curva Flujo vs. % Betún Adicional

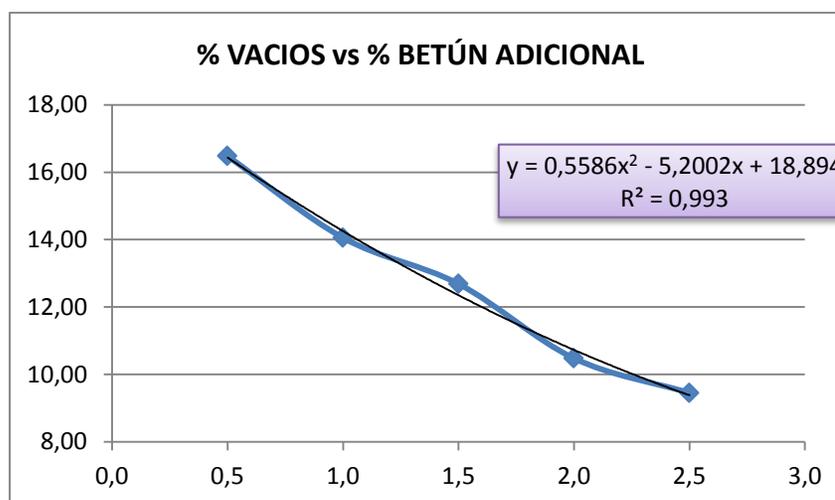
(Reciclado al 100%)



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.4: Curva % Vacíos vs. % Betún Adicional

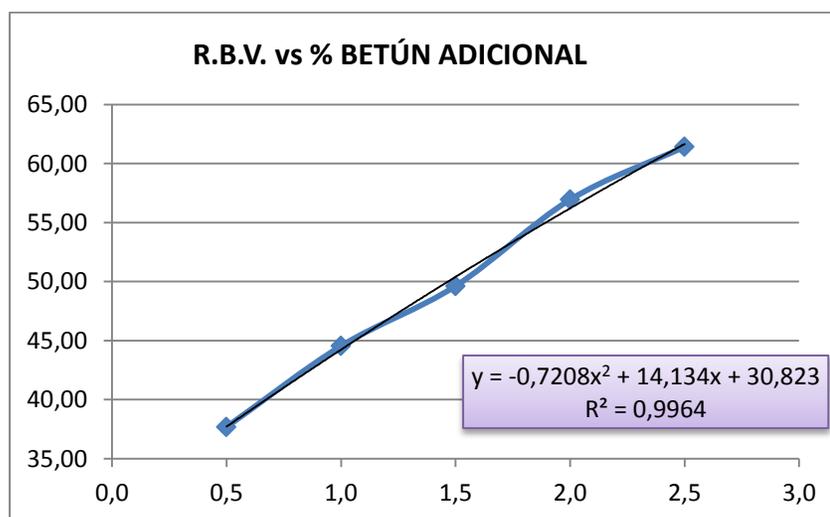
(Reciclado al 100%)



Fuente: Elaboración Propia

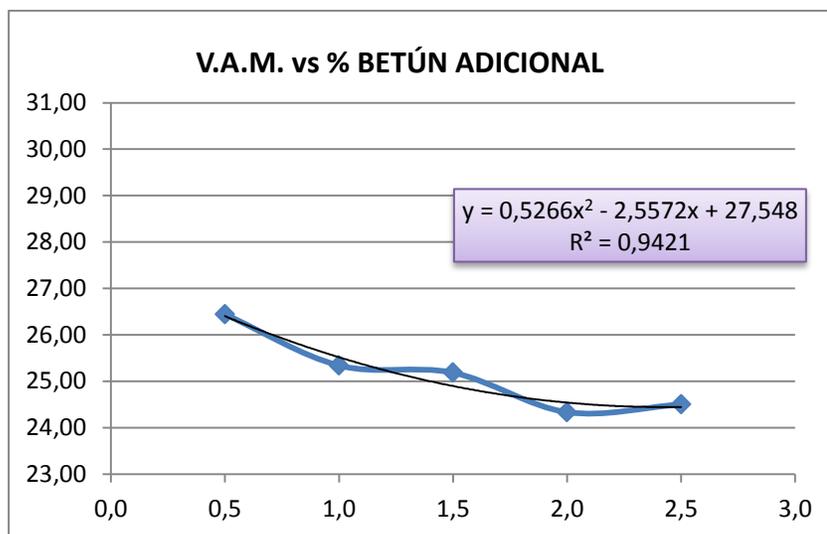
Gráfico 3.5: Curva Relación Betún - Vacíos vs. % Betún Adicional

(Reciclado al 100%)



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.6: Curva Vacíos Agregado Mineral vs. % Betún Adicional
(Reciclado al 100%)



Fuente: Elaboración Propia

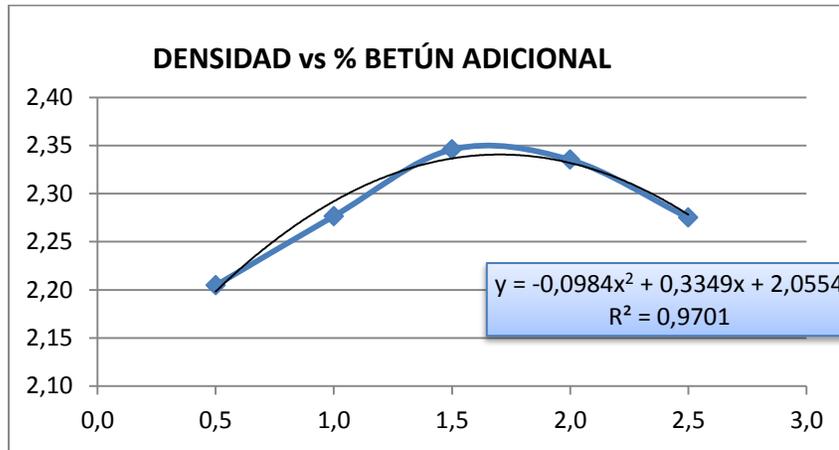
RESULTADOS DE LA PRÁCTICA PARA MUESTRA RECICLADA COMBINADA:

Tabla 3.24: Tabla de resultados del ensayo Marshall para muestra reciclada combinada

PORCENTAJE DE BETÓN ADICIONAL	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	ESTABILIDAD (libras)	FLUJO	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÓN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
0,5	2,20	4485,56	6,92	14,31	40,96	24,24
1,0	2,28	4574,40	7,22	10,79	51,33	22,18
1,5	2,35	4639,92	7,74	7,34	63,72	20,23
2,0	2,34	4555,77	8,76	7,02	66,58	21,02
2,5	2,27	4129,31	9,12	8,70	62,92	23,46

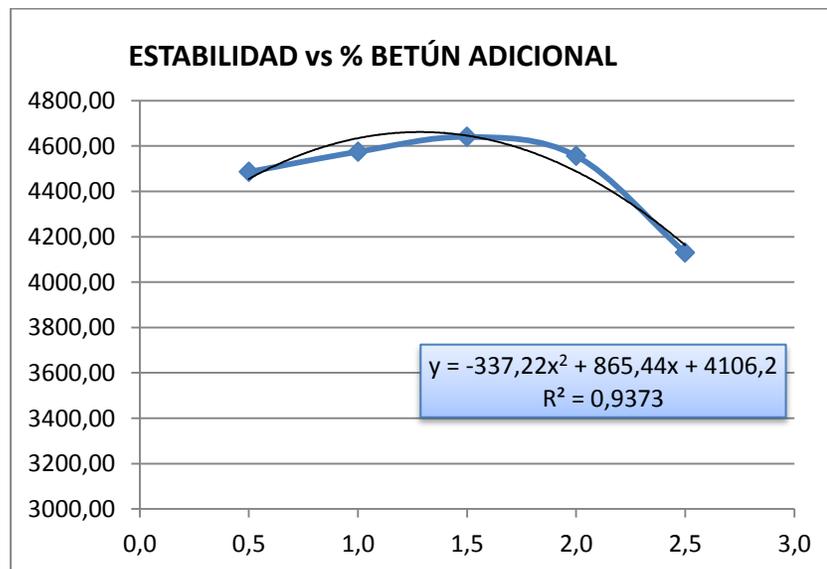
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.7: Curva Densidad vs. % Betún Adicional
(Reciclado Combinado)



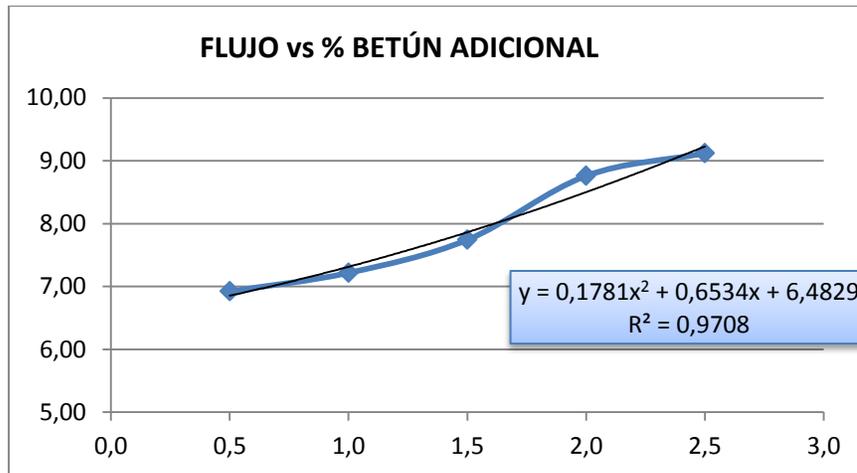
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.8: Curva Estabilidad vs. % Betún Adicional
(Reciclado Combinado)



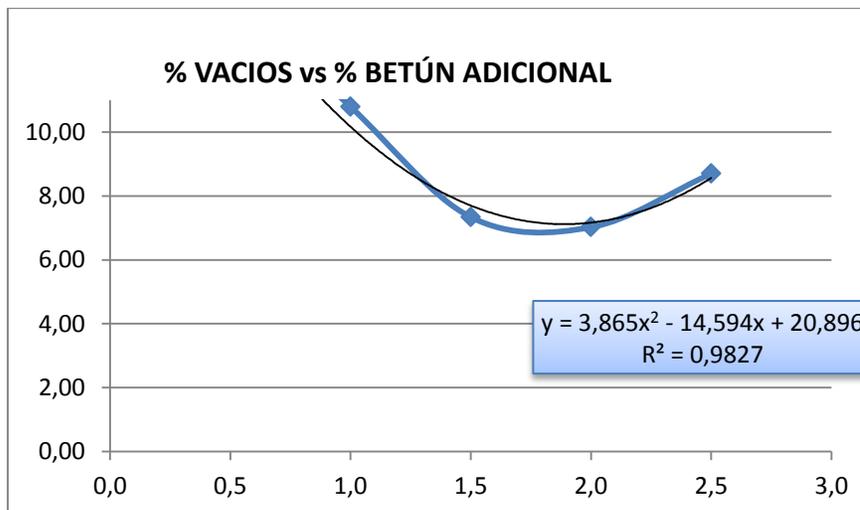
Fuente: Elaboración Propia

*Gráfico 3.9: Curva Flujo vs. % Betún Adicional
(Reciclado Combinado)*



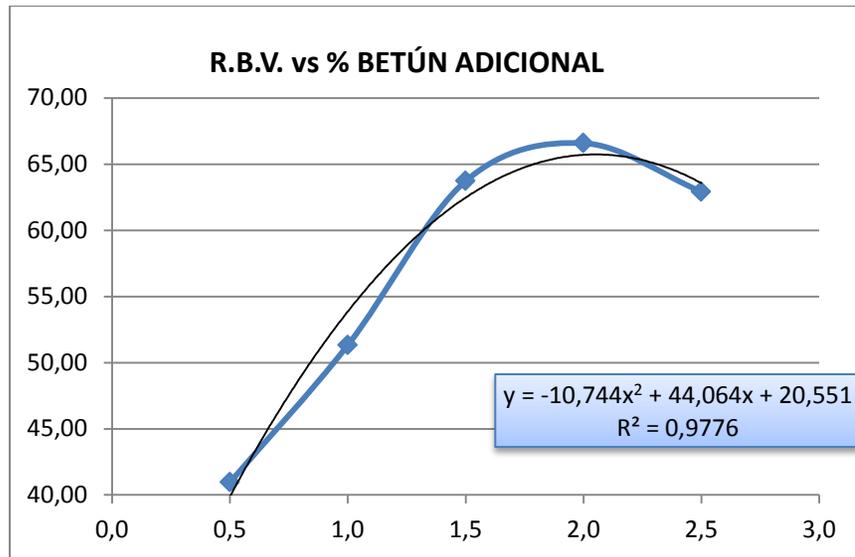
Fuente: Elaboración Propia

*Gráfico 3.10: Curva % Vacíos vs. % Betún Adicional
(Reciclado Combinado)*



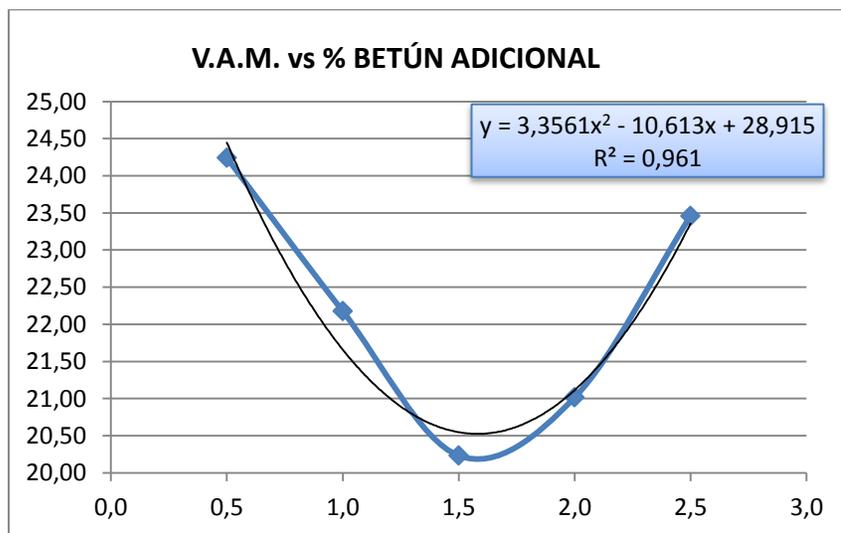
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.11: Curva Relación Betún - Vacíos vs. % Betún Adicional
(Reciclado Combinado)



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3.12: Curva Volumen Agregado Mineral vs. % Betún Adicional
(Reciclado Combinado)



Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO IV

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE BETÚN ADICIONAL DE LA CARPETA ASFÁLTICA A RECICLAR DE LA AVENIDA LA PAZ

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA RESISTENCIA TÉCNICA POR EL MÉTODO MARSHALL

4.1.1. CUADROS RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Tabla 4.1: Tabla de ensayos realizados para el material a reciclar

	Ensayos	Resultados					Promedio	
Extracción Centrífuga	% Cemento Asfáltico Envejecido (%)	3,90	4,07	4,17			4,04	
	% Agregado Pétreo (%)	96,10	95,93	95,84			95,96	
Caracterización Cemento Asfáltico Envejecido	Penetración (mm)	217	221	205			214	
	Viscosidad (mm ² /s)	247					247	
Caracterización Agregado Pétreo Envejecido	Granulometría (%)	% Pasa, tamiz N°:					-	
		1"	3/4"	3/8"	N°4	N°8		N°200
		100	94,66	73,98	53,43	40,23		1,35
	Peso Específico Agregado Grueso (gr/cm ³)	2,85	2,86	2,84			2,85	
Peso Específico Agregado Fino (gr/cm ³)	2,89	2,9	2,89			2,89		

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.2: Tabla de ensayos realizados para el material nuevo de aporte

	Ensayos	Resultados					Promedio	
Caracterización del Betún Nuevo	Penetración (mm)	93	95	95			95	
	Viscosidad (mm ² /s)	325	297	318			313	
	Peso Específico (gr/cm ³)	1,003	1,013	1,008			1,008	
	Ductilidad (cm)	115	105	107			109	
	Punto de Inflamación (°C)	> 280	> 290	> 295			> 288	
	Punto de Ablandamiento (°C)	44	47	43			45	
Caracterización del Agregado Nuevo de Aporte	Granulometría de la Grava (%)	% Pasa, tamiz N°:					-	
		1"	3/4"	3/8"	N°4	N°8		N°200
		100	79,91	2,12	0,71	0,71		0,64
	Granulometría de la Gravilla (%)	100	100	87,45	21,40	4,21	2,22	-
	Granulometría de la Arena (%)	-	-	99,57	93,51	69,98	12,05	-
	Peso Específico de la Grava (gr/cm ³)	2,59	2,58	2,58				2,58
	Peso Específico de la Gravilla (gr/cm ³)	2,61	2,61	2,61				2,61
	Peso Específico de la Arena (gr/cm ³)	2,71	2,66	2,65				2,67
	Desgaste de los Ángeles de la Grava (%)	28,13	28,11	28,14				28,13
	Desgaste de los Ángeles de la Gravilla (%)	24,10	24,06	24,21				24,12
	Equivalente de Arena (%)	93,40	93,00	92,31				92,9

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO BÁSICO

Para el presente trabajo se aplicó la Estadística de Student con una confiabilidad del 95 %, a los datos obtenidos de las lecturas realizadas durante los ensayos por el Método Marshall.

La ecuación a aplicar es la siguiente:

$$R_k = R_m \pm k * s$$

Dónde:

R_k = Resistencia Técnica Característica Marshall

R_m = Resistencia Técnica Promedio Marshall

k = Coeficiente Student

s = Desviación Estándar

Tabla 4.3: Valores del coeficiente de Student

N° de Ensayos menos uno	k	N° de Ensayos menos uno	k	N° de Ensayos menos uno	k
(N-1)		(N-1)		(N-1)	
1	6,31	11	1,8	21	1,72
2	2,92	12	1,78	22	1,72
3	2,35	13	1,77	23	1,71
4	2,13	14	1,76	24	1,71
5	2,02	15	1,75	25	1,71
6	1,94	16	1,75	26	1,71
7	1,9	17	1,74	27	1,70
8	1,86	18	1,73	28	1,70
9	1,85	19	1,73	29	1,70
10	1,81	20	1,72	30	1,70
				Mayor a 30	1,64

4.1.3. ANÁLISIS DE LA MEZCLA RECICLADA AL 100%

Tabla 4.4: Tabla Resumen para la determinación del Porcentaje Óptimo de Betún Adicional para mezcla reciclada al 100%

PORCENTAJE DE BETÚN ADICIONAL (%)	Resistencia Técnica Método Marshall					
	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	ESTABILIDAD (libras)	FLUJO	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
0,5	2,21	6273,79	6,92	16,48	37,69	26,44
1,0	2,26	6328,84	8,23	14,05	44,54	25,34
1,5	2,27	6334,63	8,53	12,69	49,63	25,19
2,0	2,31	6763,71	8,76	10,48	56,94	24,33
2,5	2,32	6879,08	9,12	9,45	61,42	24,50
Valor promedio	2,28	6516,01	8,31	12,63	50,04	25,16
Porcentaje de Betún Adicional para cada valor promedio (%)	1,36	1,72	1,25	1,42	1,47	1,26
PROMEDIO FINAL DE BETÚN ADICIONAL (%)	1,41					

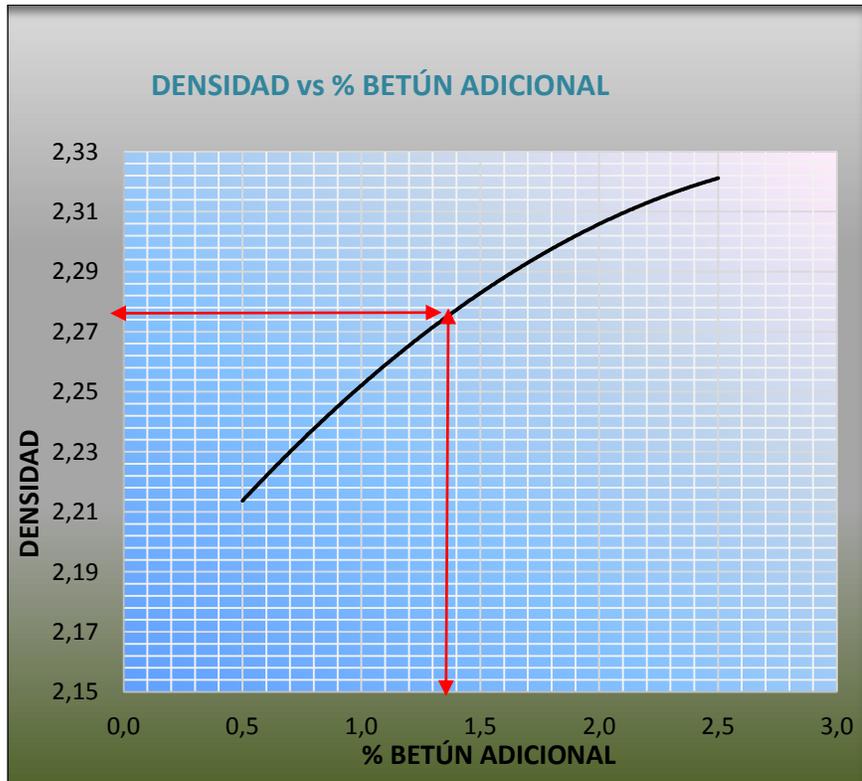
Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4.2 se determinan los valores promedios de Densidad, Estabilidad, Flujo, % de Vacíos, Relación Betún – Vacíos, y Vacíos de Agregado Mineral, con los cuales entramos a las ecuaciones de las curvas de tendencia y obtenemos el porcentaje de betún adicional para cada valor promedio. Luego se determina una media de los valores promedio de porcentajes de betún adicional, este valor llega a ser el Porcentaje Óptimo de Betún Adicional para el Reciclado de la Carpeta Asfáltica al 100%.

EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE BETÚN ADICIONAL PARA EL RECICLADO AL 100% DE LA CARPETA ASFÁLTICA DE LA AVENIDA LA PAZ ES IGUAL AL 1,41%.

Este porcentaje se visualiza mejor en las curvas de Resistencia Técnica por el Método Marshall:

*Gráfico 4.1: Curva Densidad vs. % Betún Adicional
(Reciclado al 100%)*



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que la densidad es directamente proporcional al % de Betún Adicional, es decir que a mayor % de Betún Adicional, mayor será la Densidad. A su vez el % Óptimo de Betún Adicional recae sobre el promedio de la Densidad.

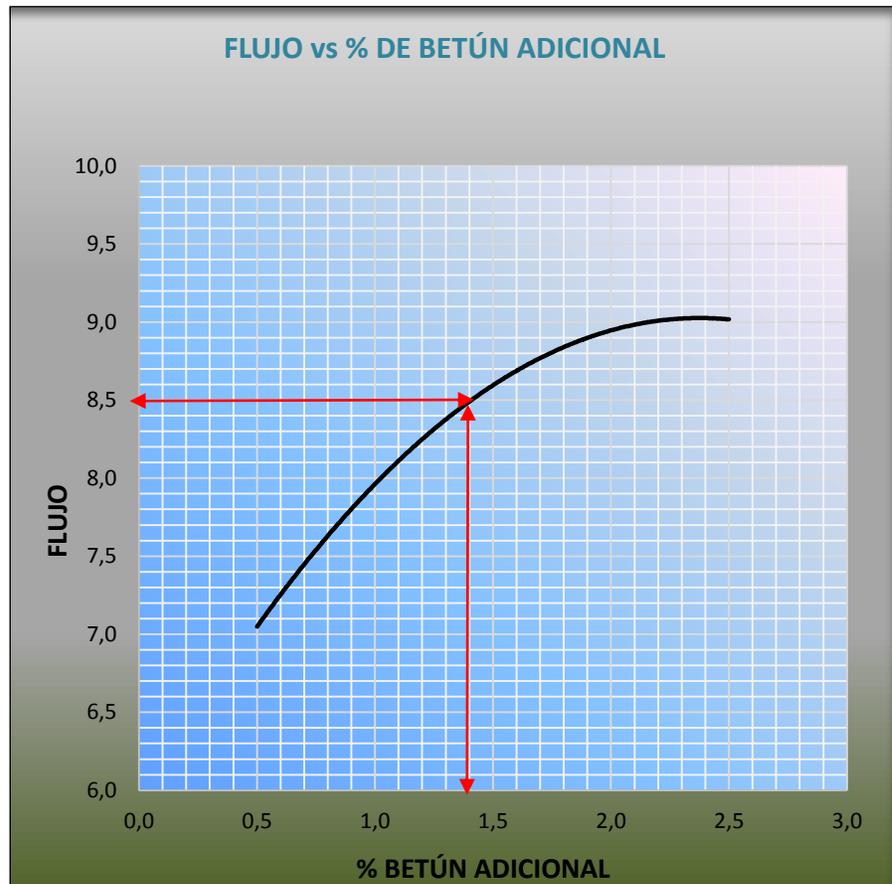
*Gráfico 4.2: Curva Estabilidad vs. % Betún Adicional
(Reciclado al 100%)*



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que la Estabilidad crece a medida que el % de Betún Adicional aumenta, es decir que a mayor % de Betún Adicional, mayor será la Estabilidad.

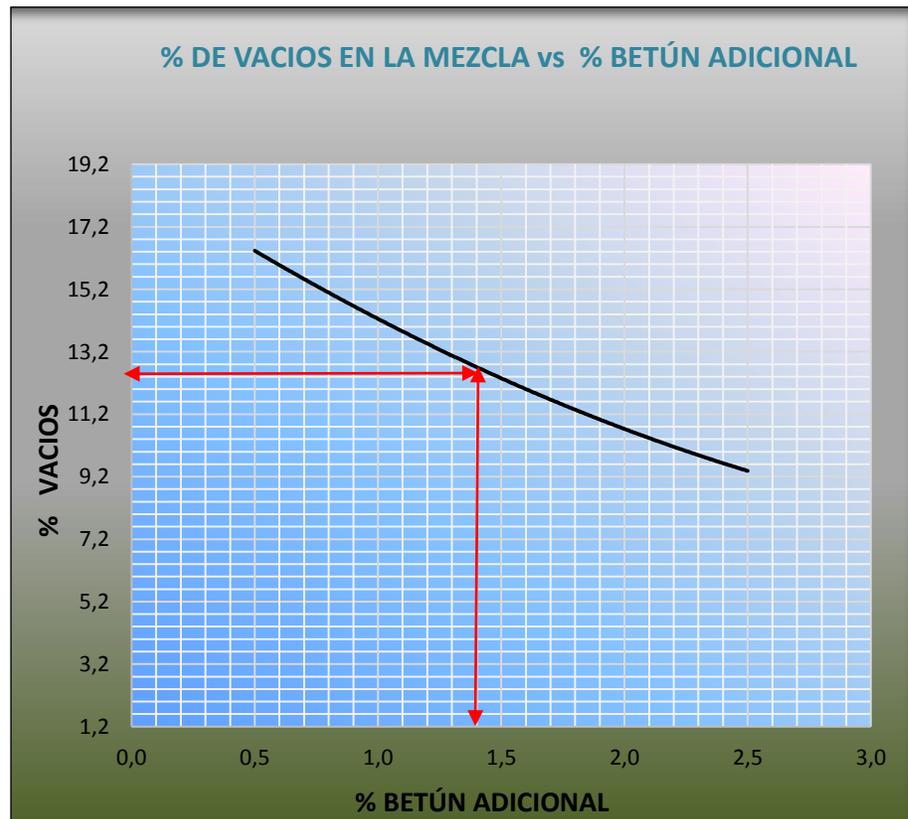
Gráfico 4 .3: Curva Flujo vs. % Betún Adicional
(Reciclado al 100%)



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que el Flujo es proporcional al % de Betún Adicional, es decir que a mayor % de Betún Adicional, mayor será el Flujo.

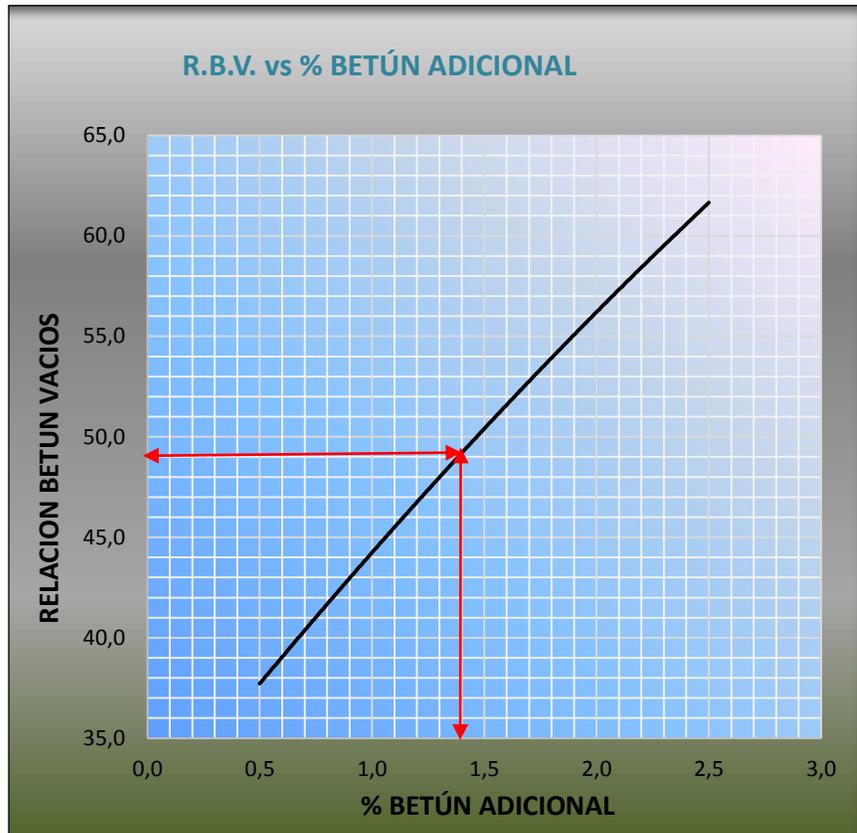
Gráfico 4.4: Curva % Vacíos vs. % Betún Adicional
(Reciclado al 100%)



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que el % de Vacíos es inversamente proporcional al % de Betún Adicional, es decir que a mayor % de Betún Adicional, existirá menos Vacíos en la carpeta asfáltica.

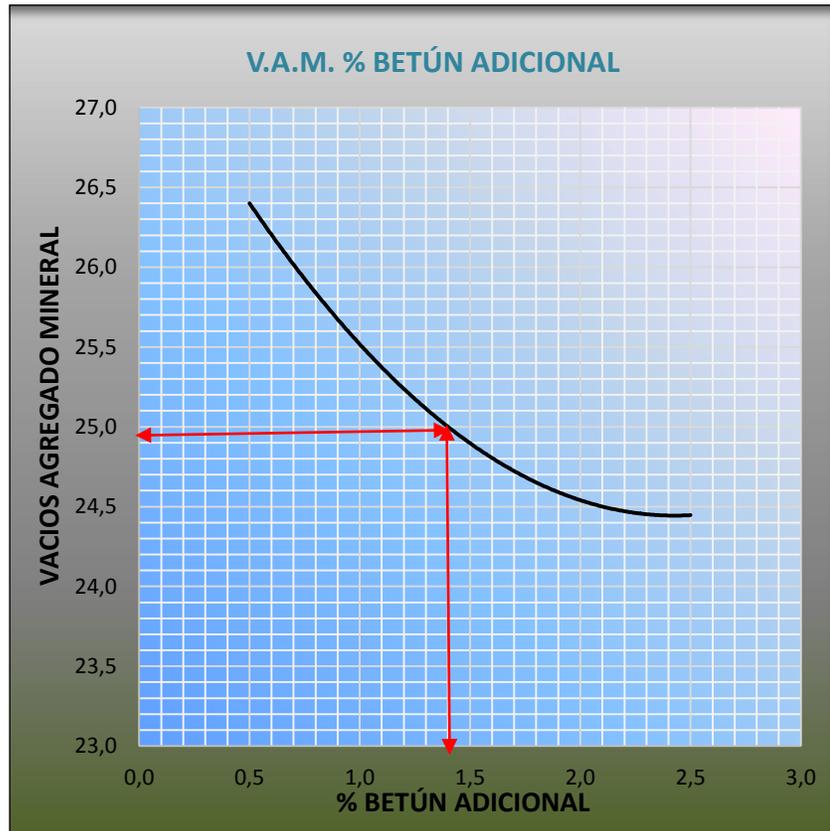
Gráfico 4.5: Curva Relación Betún - Vacíos vs. % Betún Adicional
(Reciclado al 100%)



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que la Relación Betún-Vacíos es directamente proporcional al % de Betún Adicional, es decir que a mayor % de Betún Adicional, mayor será la Relación Betún-Vacíos.

Gráfico 4.6: Curva Vacíos Agregado Mineral vs. % Betún Adicional
(Reciclado al 100%)



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que los Vacíos del Agregado Mineral generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con los aumentos del % de Betún Adicional. En este caso el Porcentaje Óptimo de Betún Adicional expresa un valor intermedio de Vacíos de Agregado Mineral

4.1.4. ANÁLISIS DE LA MEZCLA RECICLADA COMBINADA CON AGREGADOS NUEVOS

Tabla 4.5: Tabla Resumen para la determinación del Porcentaje Óptimo de Betún Adicional para mezcla Combinada con Agregados Nuevos.

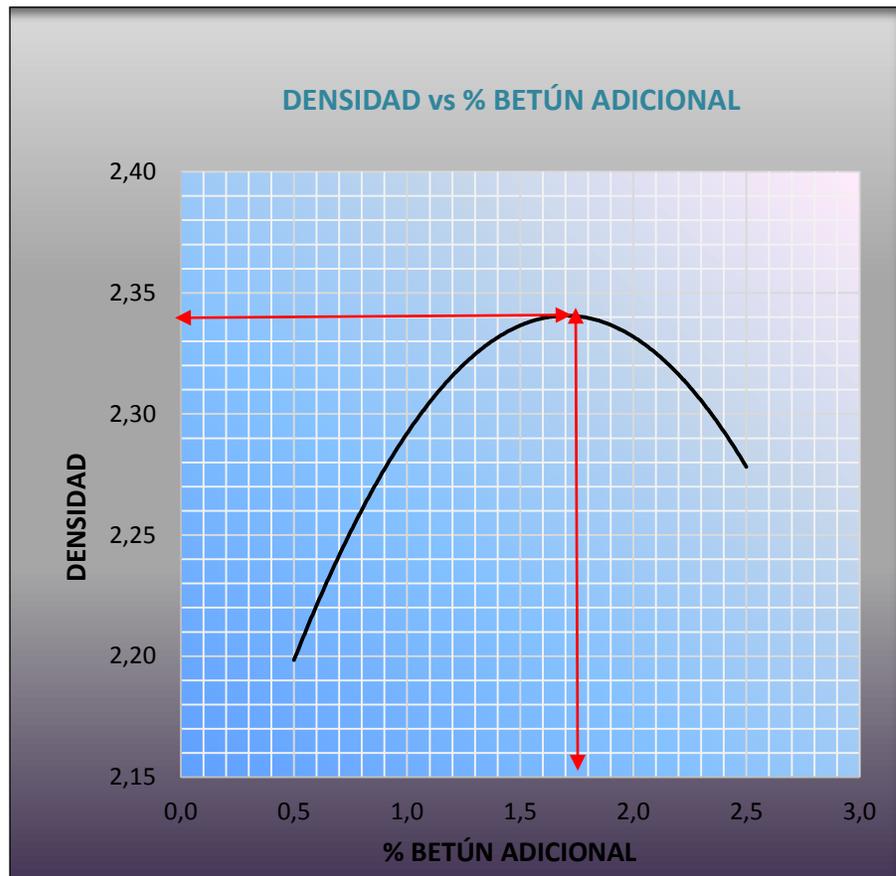
PORCENTAJE DE BETÚN ADICIONAL	Resistencia Técnica Método Marshall					
	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)	ESTABILIDAD (libras)	FLUJO	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN BETÚN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
0,5	2,20	4485,56	6,92	14,31	40,96	24,24
1,0	2,28	4574,40	7,22	10,79	51,33	22,18
1,5	2,35	4639,92	7,74	7,34	63,72	20,23
2,0	2,34	4555,77	8,76	7,02	66,58	21,02
2,5	2,27	4129,31	9,12	8,70	62,92	23,46
Valor promedio	2,29	4476,99	7,95	9,63	57,10	22,22
Porcentaje de Betún Adicional para cada valor promedio	2,44	2,03	1,58	1,08	1,16	2,29
PROMEDIO FINAL	1,76					

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4.3 se determinan los valores promedios de Densidad, Estabilidad, Flujo, % de Vacíos, Relación Betún – Vacíos, y Vacíos de Agregado Mineral, con los cuales entramos a las ecuaciones de las curvas de tendencia y obtenemos el porcentaje de betún adicional para cada valor promedio. Luego se determina una media de los valores promedio de porcentajes de betún adicional, este valor llega a ser el Porcentaje Óptimo de Betún Adicional para el Reciclado de la Carpeta Asfáltica Combinada con Agregados Nuevos de Aportación.

EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE BETÚN ADICIONAL PARA EL RECICLADO COMBINADO DE AGREGADOS NUEVOS CON LA CARPETA ASFÁLTICA DE LA AVENIDA LA PAZ ES IGUAL AL 1,76%,

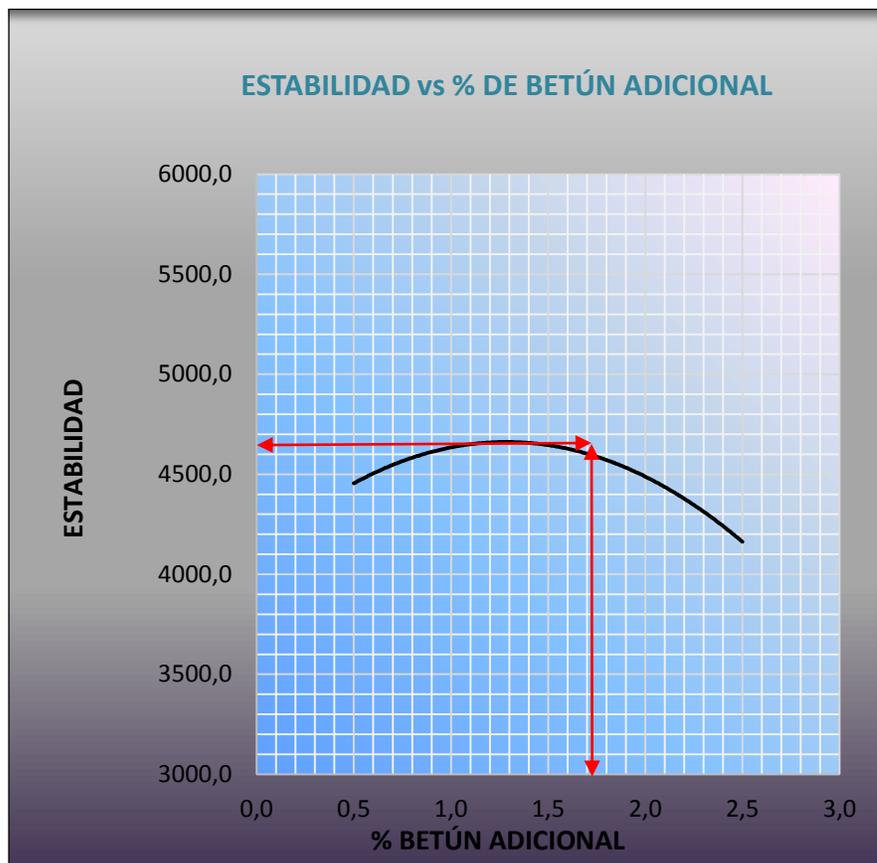
Gráfico 4.7: Curva Densidad vs. % Betún Adicional
(Reciclado Combinado)



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que el Porcentaje Óptimo de Betún Adicional recae sobre la Densidad más alta expresada como el máximo valor de la curva.

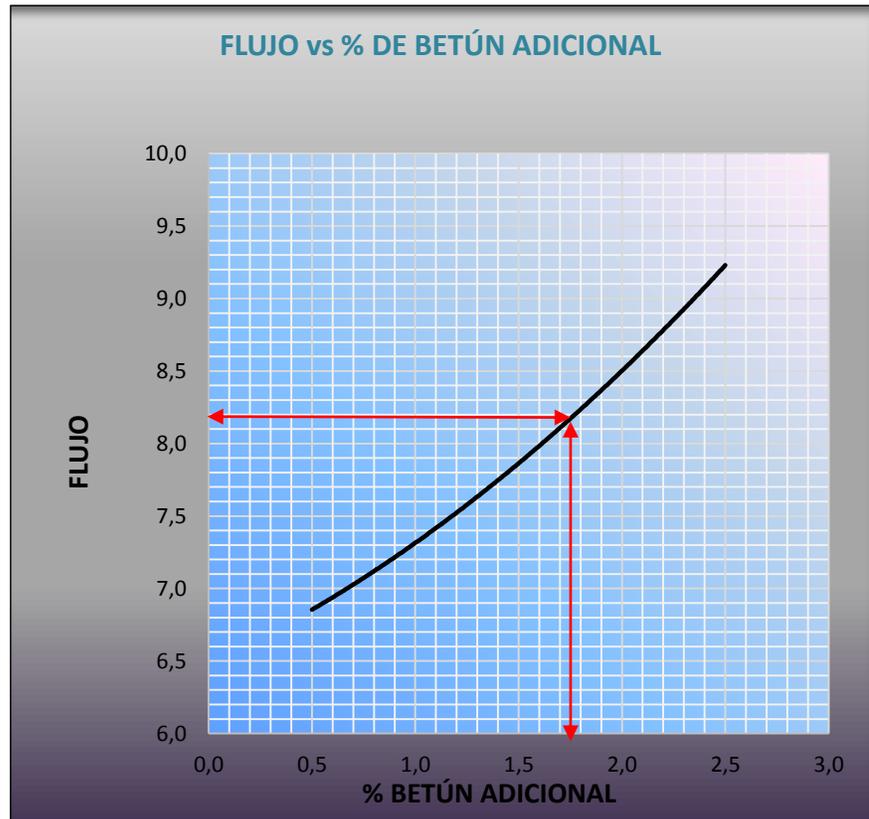
Gráfico 4.8: Curva Estabilidad vs. % Betún Adicional
(Reciclado Combinado)



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que la mayor Estabilidad aumenta a medida que el % de Betún Adicional aumenta, pero más allá de este punto, la estabilidad disminuye con cualquier incremento de Betún Adicional; es decir, el Porcentaje Óptimo de Betún Adicional se encuentra en un punto intermedio de los valores de Estabilidad.

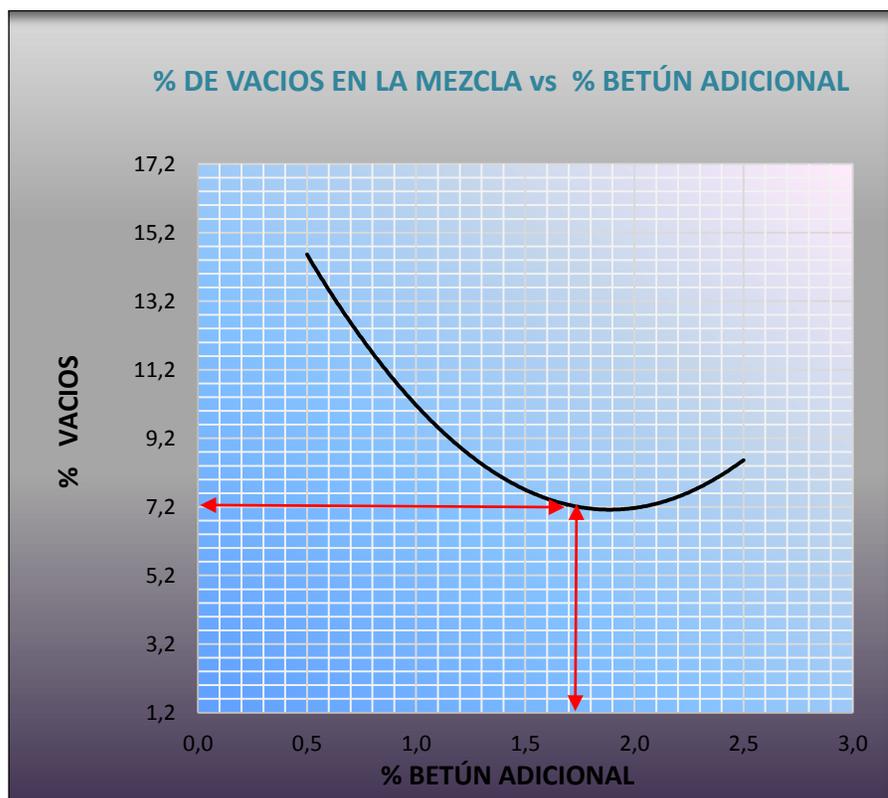
Gráfico 4.9: Curva Flujo vs. % Betún Adicional
(Reciclado Combinado)



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que el Flujo es proporcional al % de Betún Adicional, es decir que a mayor % de Betún Adicional, mayor será el Flujo. Y el Porcentaje Óptimo de Betún Adicional recae sobre el promedio de los valores del flujo.

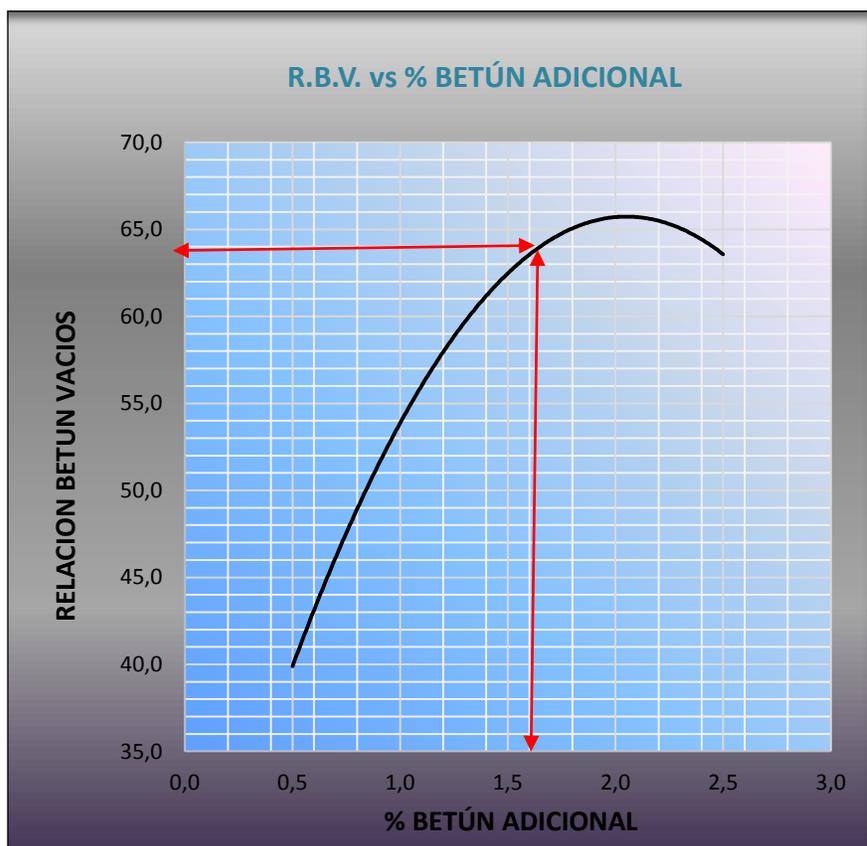
Gráfico 4.10: Curva % Vacíos vs. % Betún Adicional
(Reciclado Combinado)



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que el % de Vacíos de la mezcla es el menor posible para el Porcentaje Óptimo de Betún Adicionales, por lo tanto existirá menos Vacíos en la carpeta asfáltica cuando se trabaje con el valor óptimo.

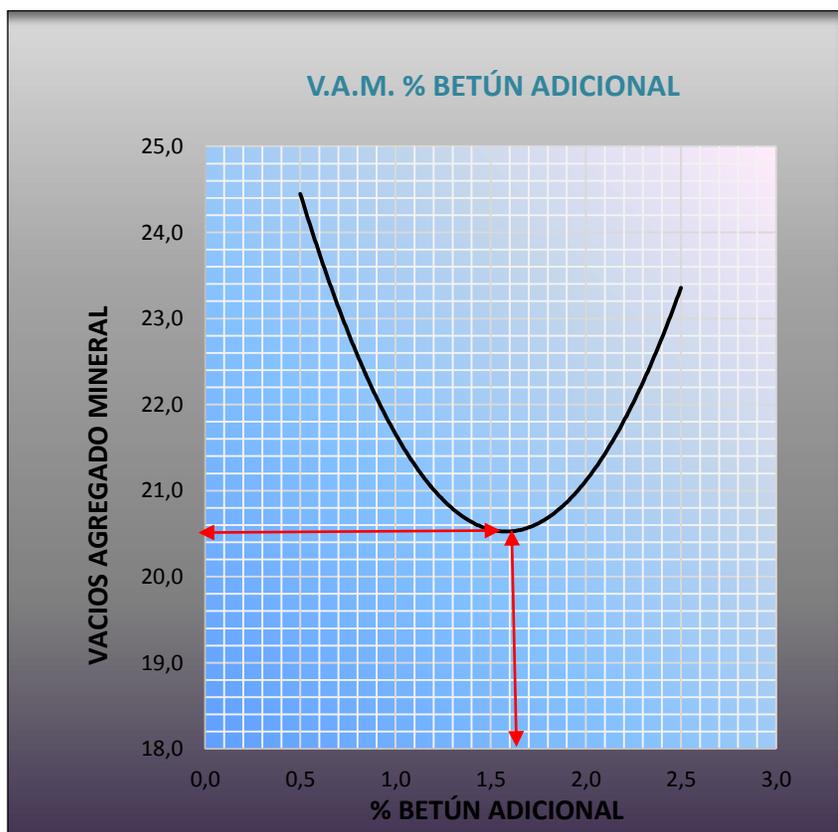
Gráfico 4.11: Curva Relación Betún - Vacíos vs. % Betún Adicional (Reciclado Combinado)



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que el valor de la Relación Betún-Vacíos expresa el promedio para el Porcentaje Óptimo de Betún Adicional, por lo tanto los vacíos llenos de betún que se generen por el betún sobrepasan los límites mínimos, llegando casi a los valores máximos, lo cual sería lo ideal, ya que mientras más % de Betún Adicional exista, el Betún llenará más los vacíos de la carpeta asfáltica reciclada.

Gráfico 4.12: Curva Volumen Agregado Mineral vs. % Betún Adicional (Reciclado Combinado)



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico se observa que el menor valor de los Vacíos del Agregado Mineral recae con el % Óptimo de Betún Adicional, es decir que con el % Óptimo de Betún Adicional, existirá menos Vacíos del Agregado Mineral en la carpeta asfáltica.

4.2. ANÁLISIS DE COSTOS

A continuación se muestran las planillas de precios unitarios y de costo total de los dos tipos de reciclado en análisis de reciclado de la carpeta asfáltica tanto al 100% como del combinado con agregado nuevo de aporte, comparados con una mezcla asfáltica convencional.

Tabla 4.6. Análisis de Precios Unitarios de la Carpeta Asfáltica Convencional

Actividad: CARPETA DE CEMENTO ASFÁLTICO (SUMINISTRO, EJECUCIÓN Y TRANSPORTE) Cantidad: 1.117,20 Unidad: m ³ Moneda: Bolivianos				
1.- MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDA D	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL
CEMENTO ASFÁLTICO	ton	0,1540	11.345,00	1.747,13
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/4"	m ³	0,4800	162,00	77,76
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/8"	m ³	0,3500	162,00	56,70
ARENA CLASIFICADA	m ³	0,4900	145,00	71,05
DIESEL	lt	18,0000	3,72	66,96
TOTAL MATERIALES				2.019,60
2.- MANO DE OBRA				
CHOFER	hr	0,0012	15,14	0,02
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	hr	0,8201	23,28	19,09
OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	hr	0,0820	18,30	1,50
OPERADOR EN PLANTA	hr	0,0900	23,28	2,10
AYUDANTE DE MAQUINARIA Y EQUIPO	hr	0,0280	15,14	0,42
CAPATAZ	hr	1,8000	22,60	40,68
PEÓN	hr	0,0720	11,98	0,86
SUBTOTAL MANO DE OBRA				64,67
BENEFICIOS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)			71,18 %	46,03
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO = (% SUBTOTAL M.O. + CARGAS SOCIALES)			14,94 %	16,54
TOTAL MANO DE OBRA				127,25
3.- EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS ≥ 950	hr	0,0001	422,27	0,04
COMPACTADOR RODILLO LISO AUTOTROP m ² /hr	hr	0,0350	301,36	10,55
DISTRIBUIDOR DE MEZCLA AUTOPROPULSADO m ³	hr	0,0280	458,75	12,85
ESCOBA MECÁNICA AUTOPROPULSADA m ² /hr	hr	0,0280	67,93	1,90
PLANTA DE CALENTAMIENTO DE ASFALTO TN	hr	0,0900	962,34	86,61
RODILLO NEUMÁTICO TSP ≥ 1000	hr	0,0840	332,33	27,92
TERMINADORA DE ASFALTO	hr	0,0750	683,06	51,23
VOLQUETA ≥ 8 m ³	hr	0,0300	223,06	6,69
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA)			5,00 %	6,36
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				204,15
4.- GASTOS GENERALES				
GASTOS GENERALES = % DE (1+2+3)			18,00 %	423,18
TOTAL GASTOS GENERALES				423,18
5.- UTILIDAD				
UTILIDADES = % (de 1+2+3+4)			10,00 %	277,42
TOTAL UTILIDAD				277,42
6.- IMPUESTOS				
IMPUESTOS A LAS TRANSACCIONES = % DE (de 1+2+3+4+5)			3,09 %	94,29
TOTAL IMPUESTOS				94,29
TOTAL PRECIO UNITARIO				3.145,88

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.7. Análisis de Precios Unitarios de la Carpeta Asfáltica Reciclada al 100%

Actividad: CARPETA DE CEMENTO ASFÁLTICO RECICLADO AL 100% (SUMINISTRO, EJECUCIÓN Y TRANSPORTE) Cantidad: 1.117,20 Unidad: m3 Moneda: Bolivianos				
1.- MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL
CEMENTO ASFÁLTICO	ton	0,0453	11.345,00	513,66
DIESEL	lt	30,0000	3,72	111,60
TOTAL MATERIALES				625,26
2.- MANO DE OBRA				
CHOFER	hr	0,0870	15,14	1,32
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	hr	0,8201	23,28	19,09
OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	hr	0,0820	18,30	1,50
OPERADOR EN PLANTA	hr	0,1000	23,28	2,33
A YUDANTE DE MAQUINARIA Y EQUIPO	hr	0,0280	15,14	0,42
CAPATAZ	hr	1,8000	22,60	40,68
PEÓN	hr	0,1800	11,98	2,16
SUBTOTAL MANO DE OBRA				67,50
BENEFICIOS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)			71,18 %	48,05
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO = (% SUBTOTAL M.O. + CARGAS SOCIALES)			14,94 %	17,26
				132,81
3.- EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS ≥ 950	hr	0,0001	422,27	0,04
COMPACTADOR RODILLO LISO AUTOTROP m2 /hr	hr	0,0350	301,36	10,55
DISTRIBUIDOR DE MEZCLA AUTOPROPULSADO m3	hr	0,0280	458,75	12,85
ESCOBA MECÁNICA AUTOPROPULSADA m2/hr	hr	0,0280	67,93	1,90
PLANTA DE CALENTAMIENTO DE ASFALTO TN	hr	0,0900	962,34	86,61
RODILLO NEUMÁTICO TSP ≥ 1000	hr	0,0840	332,33	27,92
BULLDOZER	hr	0,0330	528,78	17,45
TERMINADORA DE ASFALTO	hr	0,0750	683,06	51,23
VOLQUETA ≥ 8 m3	hr	0,0700	223,06	15,61
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA)			5,00 %	6,64
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				230,80
4.- GASTOS GENERALES				
GASTOS GENERALES = % DE (1+2+3)			18,00 %	177,99
TOTAL GASTOS GENERALES				177,99
5.- UTILIDAD				
UTILIDAD = % (de 1+2+3+4)			10,00 %	116,69
TOTAL UTILIDAD				116,69
6.- IMPUESTOS				
IMPUESTOS A LAS TRANSACCIONES = % DE (de 1+2+3+4+5)			3,09 %	39,66
TOTAL IMPUESTOS				39,66
TOTAL PRECIO UNITARIO				1.323,20

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.8. Análisis de Precios Unitarios de la Carpeta Asfáltica Combinada

Actividad: CARPETA DE CEMENTO ASFÁLTICO RECICLADO CON AGREGADOS DE APORTE (SUMINISTRO, EJECUCIÓN Y TRANSPORTE) Cantidad: 1.117,20 Unidad: m3 Moneda: Bolivianos				
1.- MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDA D	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL
CEMENTO ASFÁLTICO	ton	0,05482	11.345,00	621,98
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/4"	m3	0,07143	162,00	11,57
GRAVA TRITURADA CLASIFICADA 3/8"	m3	0,11429	162,00	18,51
ARENA CLASIFICADA	m3	0,10000	145,00	14,50
DIESEL	lt	32,0000	3,72	119,04
TOTAL MATERIALES				785,60
2.- MANO DE OBRA				
CHOFER	hr	0,0870	15,14	1,32
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	hr	0,8201	23,28	19,09
OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	hr	0,0820	18,30	1,50
OPERADOR EN PLANTA	hr	0,1100	23,28	2,56
AYUDANTE DE MAQUINARIA Y EQUIPO	hr	0,0280	15,14	0,42
CAPATAZ	hr	1,8000	22,60	40,68
PEÓN	hr	0,1800	11,98	2,16
SUBTOTAL MANO DE OBRA				67,73
BENEFICIOS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)			71,18 %	48,21
IMPUESTO AL VALOR AGREGADO = (% SUBTOTAL M.O. + CARGAS SOCIALES)			14,94 %	17,32
TOTAL MANO DE OBRA				133,26
3.- EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
CARGADOR FRONTAL DE RUEDAS ≥ 950	hr	0,0001	422,27	0,04
COMPACTADOR RODILLO LISO AUTOTROP m2 /hr	hr	0,0350	301,36	10,55
DISTRIBUIDOR DE MEZCLA AUTOPROPULSADO m3	hr	0,0280	458,75	12,85
ESCOBA MECÁNICA AUTOPROPULSADA m2/hr	hr	0,0280	67,93	1,90
BULLDOZER	hr	0,0330	528,78	17,45
PLANTA DE CALENTAMIENTO DE ASFALTO TN	hr	0,0900	962,34	86,61
RODILLO NEUMÁTICO TSP ≥ 1000	hr	0,0840	332,33	27,92
TERMINADORA DE ASFALTO	hr	0,0750	683,06	51,23
VOLQUETA ≥ 8 m3	hr	0,0700	223,06	15,61
HERRAMIENTAS = (% DEL TOTAL DE LA MANO DE OBRA)			5,00 %	6,66
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				230,82
4.- GASTOS GENERALES				
GASTOS GENERALES = % DE (1+2+3)			18,00 %	206,94
TOTAL GASTOS GENERALES				206,94
5.- UTILIDAD				
UTILIDAD = % DE (1+2+3+4)			10,00 %	135,66
TOTAL UTILIDAD				135,66
6.- IMPUESTOS				
IMPUESTOS A LAS TRANSACCIONES = % DE (de 1+2+3+4+5)			3,09 %	46,11
TOTAL IMPUESTOS				46,11
TOTAL PRECIO UNITARIO				1.538,41

Fuente: Elaboración Propia

4.2.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS

Tabla 4.9. Análisis Comparativo de Costos de las Carpetas Asfálticas en estudio

ACTIVIDAD	PRECIO UNITARIO (Bs/m ³)	CANTIDAD (m ³)	COSTO FINAL (Bs)	% DE GASTO (%)	% DE AHORRO (%)
Carpeta de Cemento Asfáltico (Suministro, Ejecución y Transporte)	3.145,88	1.117,20	3.514.579,67	100,00	0,00
Carpeta de Cemento Asfáltico Reciclado al 100% (Suministro, Ejecución y Transporte)	1.323,20	1.117,20	1.478.278,49	42,06	57,94
Carpeta de Cemento Asfáltico Reciclado con Agregados de Aporte (Suministro, Ejecución y Transporte)	1.538,41	1.117,20	1.718.706,89	48,90	51,10

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla se destaca la diferencia de Precios Unitarios, y por consiguiente del Costo Final, manteniendo constante la cantidad de 1.117,20 m³, a partir de un cálculo de aproximación de volumen a ocupar en el trayecto de la avenida La Paz desde la avenida las Américas hasta la avenida Circunvalación, con una longitud igual a 1.330,00 Km, con un ancho de 12 m y un espesor de 7 cm.

La carpeta asfáltica convencional tiene un gasto del 100% ya que expresa costos de materiales de nuevos, porque se hace uso en su totalidad del cemento asfáltico nuevo, y de los agregados pétreos vírgenes y debidamente seleccionados.

La carpeta asfáltica reciclada al 100%, expresa un gasto del 42.06% comparado al costo de la carpeta asfáltica convencional y un ahorro del 57.94%, siendo el porcentaje más elevado de las dos formas de reciclaje estudiadas en el presente, ya que no necesita de agregados pétreos de aporte.

La carpeta asfáltica reciclada mejorando la granulometría agregando áridos nuevos, expresa un gasto del 48.90% y un ahorro del 51.10% respecto a la mezcla asfáltica convencional con un gasto en costo del 100%, llegando a tener un ahorro menor respecto a la carpeta asfáltica reciclada al 100%, debido a que para su elaboración es necesario agregar áridos vírgenes.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- En la presente investigación se han cumplido los objetivos planteados debido a que se logra obtener el porcentaje óptimo de betún adicional, demostrando que el reciclado en planta en caliente, es una opción que permite la reutilización de carpetas asfálticas deteriorada, dando como resultados de resistencias técnicas similares a las mezclas asfálticas convencionales.
- El autor realizó dos estudios de distintos puntos de vista, siendo el primero con reciclado al cien por ciento de la carpeta asfáltica y el segundo con un reciclado combinado con agregado nuevo de aportación haciendo en proporciones de 60.8% carpeta reciclada y 39.2% agregado nuevo de aportación. Para lo cual se observaron mejores resultados de resistencia técnica con la mezcla combinada.
- Es importante resaltar que los porcentajes adicionales de betún no deben ser elevados, ya que porcentajes muy altos no generan precisamente mayor resistencia técnica, es por eso que con el Método Marshall se someten los valores promedios, lo cual permite obtener un porcentaje óptimo de Betún adicional, que refleja buena resistencia a bajo costo, resguardando la economía y el uso excesivo de ligante asfáltico.
- En esta estudio se observa gráficamente que los valores de Flujo, tanto para el Reciclado al 100% como para el Reciclado Combinado con Agregado Nuevo, se encuentran en valores promedios, es decir que no se encuentran en los límites máximos ni mínimos, ya que las mezclas que tienen valores *bajos de fluencia* y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores *altos de*

fluencia son consideradas demasiado plásticas, y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas del tránsito.

- Es importante decir que la caracterización del betún nuevo de aportación, la caracterización del agregado pétreo nuevo de aportación y la caracterización del agregado que conforma la carpeta asfáltica a reciclar, son fundamentales ya que su cumplimiento nos dan la garantía de la que la mezcla tiene buenas propiedades por el lado de los materiales del cual están compuesta la misma.
- En el análisis de costos, se verifica que existe un ahorro económico mayor al 50%, para ambas formas de reciclado en planta en caliente, como lo expresa la bibliografía. Además juntamente con este ahorro económico va ligado la reducción de residuos tóxicos y de volúmenes de basura de las carpetas asfálticas deterioradas, lo que conlleva a una menor Contaminación Ambiental. También expresa una menor explotación de los bancos de áridos, resguardando y protegiendo el Medio Ambiente.

5.2. RECOMENDACIONES

- En lo posterior se recomienda profundizar el estudio ampliando el campo de investigación al reciclado de carpetas asfálticas, con el fin de proteger el medio ambiente.
- Se recomienda tener mucho cuidado al utilizar los equipos para realizar la medición ya que se necesita precisión de los mismos.
- Dar mantenimiento al equipo Marshall para compactación.
- En lo posible usar un extensómetro para medir la deformación para tener mayor precisión en el ensayo.
- Para la aplicación de las formas de reciclado propuestas en este trabajo investigativo, se recomienda el equipo y maquinaria mencionado en el capítulo II.