

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Durante los últimos años, el nivel de desarrollo alcanzado por la sociedad ha logrado gran aumento en la calidad de vida de las personas, consiguiendo el bienestar de las mismas. A causa de ello se produjeron una serie de problemas que suponen una amenaza para garantizar la satisfacción de necesidades futuras.

El uso desmedido de los recursos naturales para la construcción, es uno de esos principales problemas, ya que es responsable de la actual escasez de materias primas. Por otro lado, el creciente desarrollo industrial y tecnológico en la sociedad implica la generación del problema principal, el impacto de la contaminación ambiental, cuya definición comprendida en términos modernos incluye una visión innovadora del mejor uso de los recursos naturales del planeta bajo la definición de desarrollo sostenible.

A causa de ello, en los últimos años, se desarrollaron técnicas basadas en la reutilización de residuos, permitiendo concebir a las carreteras como una posible solución a esta problemática, ya que el correcto empleo de residuos como sustitutivos de áridos en su construcción suponen no sólo la disminución de la contaminación, sino también el mejoramiento de propiedades en carreteras, además de convertirse en una obra sustentable.

En nuestro país, y particularmente en el departamento de Tarija, hasta el momento, poco se hizo para frenar a estos enemigos del medioambiente, de cuyos actos destaca la legislación de los vertederos, la intención de fomentar el reciclaje y reutilización de residuos, pero ninguno de ellos matiza la posibilidad de su reutilización en la construcción de carreteras.

1.2. Justificación

Una de las actuaciones de mayor importancia dentro de la construcción y que tiene la mayor influencia para asegurar el nivel de desarrollo, es la construcción de carreteras. Esta actividad genera un consumo importante de recursos naturales, donde específicamente, la fabricación de las mezclas asfálticas utilizadas en las capas de la carretera implica el empleo de grandes cantidades de áridos, provocando efectos negativos medioambientales.

Además, los problemas referidos a las fallas, desgaste y agrietamiento producidos en carreteras, unidos a las restricciones ambientales en torno a la explotación de áridos, han repercutido en la dificultad para encontrar agregados de buena calidad para su construcción.

Como consecuencia de este hecho, y siguiendo la estrategia de sostenibilidad, se desarrolla la investigación presentada, tomando en cuenta que ciertos residuos pueden ser reutilizados como sustitutivos de los materiales convencionales, tal es el caso del vidrio molido, que por las propiedades y características que posee se convierte en un material altamente accesible para la conformación de mezclas asfálticas.

El beneficio obtenido con esta acción puede ser exponencial, puesto que las carreteras aparte de convertirse en un área válida para la reutilización de residuos, también contribuyen con la reducción de impactos medioambientales asociados a la explotación de canteras y el transporte de áridos, además que constituye una alternativa para el mejoramiento en las propiedades que generalmente se presenta en las mezclas.

1.3. Planteamiento del problema

1.3.1. Situación problemática

Muy a menudo se puede apreciar los fallos prematuros que presentan las carreteras en el seno de su estructura, y que con el tiempo alcanzan grandes perjuicios para las personas. Estos problemas que se presentan como el agrietamiento o desprendimiento, principalmente por la conformación de las mezclas convencionales usadas, resultan en un proceso complejo que puede originarse por diferentes mecanismos, como la sobrecarga, la fatiga, retracción térmica, el hinchamiento de arcillas de capas sensibles a la variación de humedad, o las tensiones que superan la resistencia a la fractura del revestimiento asfáltico, además del agrietamiento asociado a la temperatura que se produce cuando el movimiento horizontal exceden la resistencia del asfalto.

Por otro lado, en la actualidad, una de las mayores problemáticas y preocupaciones a nivel mundial es el cuidado del medio ambiente. Está en boga el reciclaje de materiales que pueden ser empleados en todo tipo de procedimientos permitiendo de esa manera reducir la contaminación, crear nuevos productos con menos inversión de materia prima y minimizar la explotación de recursos no renovables

Por esta razón, es preciso buscar técnicas a fin de lograr un mejoramiento en las propiedades mecánicas que presentan las mezclas asfálticas y que de tal forma no representen una amenaza para el medio ambiente. A consecuencia, cada vez más naciones están dirigiendo su atención a la posibilidad de utilizar materiales reciclados en el sector construcción, llegando esta tendencia a la ingeniería de carreteras, que considera como una posibilidad notable de construcción la utilización del vidrio molido como agregado fino analizando las propiedades que este material posee.

1.3.2. Problema

¿Podrá ser usado el vidrio molido como agregado fino en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras sustentables?

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Estudiar el uso del vidrio molido como agregado fino en la fabricación de mezclas asfálticas, para la construcción de carreteras sustentables, de tal manera que pueda concebirse como una alternativa en el mejoramiento de las propiedades para mezclas convencionales.

1.4.2. Objetivos específicos

- Establecer un proceso para la recolección de los agregados grueso y fino, cemento asfáltico, además del cemento Portland utilizado como filler, para la conformación de las mezclas asfálticas.
- Plantear una metodología para la recolección, limpieza y tratamiento de los desechos de vidrio, de manera que pueda ser usado satisfactoriamente en la investigación.
- Desarrollar la caracterización de los agregados, grueso y fino, además de la caracterización del cemento asfáltico y cemento Portland, usados en la fabricación de mezclas asfálticas ante los ensayos prescritos.
- Analizar el comportamiento de los agregados con la incorporación del vidrio molido en base a los ensayos prescritos para agregados, tomando en cuenta diferentes porcentajes de vidrio molido (5%, 10%, 15% y 20%).
- Diseñar en laboratorio mediante el método Marshall las mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas con la incorporación de vidrio molido según los diferentes porcentajes concertados, usando además cemento Portland como filler en la mezcla.
- Analizar el comportamiento de las propiedades Marshall y características especiales que se presentan en la nueva mezcla creada con el vidrio molido incorporado en relación a mezclas asfálticas convencionales.
- Verificar la factibilidad de producir mezclas asfálticas con residuos de vidrio molido, en cuanto a costo de fabricación proceso de elaboración.

1.5. Hipótesis

Al usar vidrio molido como agregado fino dentro una mezcla asfáltica mejora las propiedades que presenta la mezcla, en comparación de mezclas asfálticas convencionales.

1.6. Definición de variables

1.6.1. Variable independiente

x_1 = Vidrio molido

x_2 = Agregados pétreos

x_3 = Filler

x_4 = Cemento asfáltico

Nota: En la presente investigación únicamente se estudiará como variable independiente la variación del vidrio molido.

1.6.2. Variable dependiente

$f(x)$ = Propiedades de la mezcla asfáltica

1.6.3. Operacionalización de variables

Tabla 1: Operacionalización de variables

Variable	Indicador	Medición	Rango de variabilidad
<u>Variable independiente</u>	Cantidad	% del peso total del agregado	5 - 20%
Vidrio molido	Tamaño máximo	mm	4.75
<u>Variable dependiente</u>	Densidad	Kg/m ³	-
Propiedades de la mezcla asfáltica	Estabilidad	N	> 1800 Lb.
	Fluencia	mm	8 – 14%
	Vacíos	%	3 – 5%
	Huecos	%	-

Fuente: Elaboración propia

1.7. Diseño metodológico

1.7.1. Componentes

1.7.1.1. Unidades de estudio y decisión muestral

Unidad de estudio: Mezclas asfálticas

Población: Mezclas asfálticas modificadas

Muestra: Mezclas asfálticas elaboradas con fracción de vidrio molido como agregado fino.

Muestreo: Se dispondrá de dos modelos para evaluar el uso del vidrio molido en mezclas asfálticas. La primera mezcla será considerada como patrón, en base a experiencias desarrolladas con anterioridad. La segunda mezcla, la cual estará sometida a estudio, es la que determinará el uso del vidrio molido en mezclas asfálticas.

Para el estudio se establecen tres tipos de áridos:

Agregado grueso: Obtenido de la planta productora de agregados (Alcaldía departamental).

Agregado fino: Obtenido de la planta productora de agregados (Alcaldía departamental).

Vidrio molido: Obtenido de desechos cuyo material represente el vidrio (botellas, parabrisas, vidrios rotos, etc.), y que posteriormente deberán ser procesados para la trituración y molido correspondiente de forma manual, procurando que las partículas obtenidas se encuentren por debajo de los 5 mm.

En el caso del filler, se usará un cemento El Puente IP-30 que por las condiciones provee suficiente cohesión a la mezcla. Así mismo, se empleará un betún convencional para el desarrollo de la investigación.

1.7.2. Método y técnicas empleadas

1.7.2.1.Método

Método inductivo: La inducción es un razonamiento que analiza una porción de un todo; parte de lo particular a lo general, es decir, va de lo individual a lo universal.

La característica de este método es que utiliza el razonamiento para obtener conclusiones que parten de hechos particulares, aceptados como válidos para llegar a conclusiones cuya aplicación es de carácter general. El método se inicia con la observación individual de los hechos, se analiza la conducta y características del fenómeno, se hacen comparaciones, experimentos, etc., y se llega a conclusiones universales para postularlas como leyes, principios o fundamentos.

Las reglas del método de inducción son:

Observar cómo ciertos fenómenos están asociados y por inducción intentar descubrir la ley o los principios que permiten dicha asociación.

A partir de la ley anterior, inducir una teoría más abstracta que sea aplicable a fenómenos distintos de los que se partió.

Deducir las consecuencias de la teoría con respecto a esos nuevos fenómenos.

Efectuar observaciones o experimentos para ver si las consecuencias son verificadas por los hechos.

Dicho método considera que entre mayor sea el número de experimentos realizados, mayores serán las probabilidades de que las leyes resulten verídicas.

Asimismo, el método inductivo se caracteriza por tener 4 etapas básicas:

- a) Observación y registro de todos los hechos.
- b) Análisis y clasificación de los hechos.
- c) Derivación inductiva de una generalización a partir de los hechos.
- d) Contrastación

En una primera etapa se deberían observar y registrar todos los hechos y luego analizarlos y clasificarlos ordenadamente. A partir de los datos procesados se deriva una hipótesis que solucione el problema basada en el análisis lógico de los datos procesados. Esta derivación de hipótesis se hace siguiendo un razonamiento inductivo. En la última etapa se deduce una implicación contrastadora de hipótesis. Esta implicación debería ocurrir en el caso de que la hipótesis sea verdadera, así si se confirma la implicación contrastadora de hipótesis quedará validada la hipótesis principal.

1.7.2.2.Técnicas

Se empleará la técnica de estudio experimental, debido a que reúne los medios necesarios de instrumentación y mecanismos adecuados para desarrollar la investigación y obtener los resultados necesarios.

Para analizar el comportamiento de una mezcla asfáltica elaborada con una proporción de vidrio molido, cuyos resultados serán comparados con la mezcla asfáltica convencional, se deberá efectuar los siguientes ensayos:

Caracterización de los agregados. Antes de la fabricación de las mezclas asfálticas que serán estudiadas se requiere analizar los agregados a ser usados, mediante las siguientes pruebas:

Determinación de la granulometría.

Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles.

Determinación de caras fracturadas

Determinación de la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

Determinación de la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos.

Equivalente de arena.

Método de los sulfatos para determinar la desintegración

Adherencia agregado – ligante asfáltico.

Granulometría del filler - cemento

Cabe recalcar que cada una de estas pruebas de laboratorio se realizará para las dos muestras en estudio (la primera conformada por los áridos que conformarán la mezcla convencional, y la segunda muestra de áridos incluido el vidrio molido que actuará como agregado fino).

Diseño de mezclas asfálticas. Finalmente, luego de realizar los ensayos previos, se procederá a la fabricación de las mezclas asfálticas mediante el método Marshall, continuando con los siguientes ensayos de laboratorio:

Preparación de probetas.

Densidad real de mezclas asfálticas compactadas.

Método de diseño Marshall.

En la siguiente tabla se detalla el plan de ensayos a seguir para la conformación de las mezclas asfálticas, en base al “Manual de ensayos y materiales asfálticos” elaborado por la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.).

Tabla 2: Plan de ensayos general

Plan de ensayos general	
Agregado grueso	Método para determinar la granulometría (ASTM E 40 - AASHTO T27-99). A0506
	Método para determinar el desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99). A0511
	Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM E 127 AASHTO T85-91). A0519
	Método para determinar caras fracturadas.
	Método de los sulfatos para determinar la desintegración (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516
	Método para determinar la adherencia agregado – ligante asfáltico (ASTM D 1664). A0701
Agregado fino	Método para determinar la granulometría (ASTM E 40 - AASHTO T27-99). A0506
	Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D 2419 AASHTO T176-00). A0509
	Método para determinar la angularidad del agregado fino (ASTM C1252)
	Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128 AASHTO T84-00). A0520.
	Método para determinar la adherencia agregado – ligante asfáltico (Riedel – Weber). A0118

Filler cemento	Método para determinar la granulometría del filler. A0502
Cemento asfáltico	Método para determinar la densidad (ASTM D71-94 AASHTO T229-97). A0102
	Método de ensaye de penetración (ASTM D 5 AASHTO T49-97). A0103
	Método para determinar la ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T51-00). A0105
	Método para determinar los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01 AASHTO T79-96). A0106
	Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 AASHTO T53-96). A0110
	Método de ensaye de película delgada (ASTM D 1754 AASHTO T179-05). A0120
Diseño Marshall	Preparación de probetas (AASHTO T 245-97). A0608
	Método para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas. A0606
	Método de diseño Marshall. A0613

Fuente: Elaboración propia

1.7.2.3.Descripción de los instrumentos para la obtención de datos

Los instrumentos y equipos requeridos para la recolección de datos se describen a continuación, en función al procedimiento a ser desarrollado:

Para la recolección y tratamiento del material:

Bolsas plásticas y de yute: Necesarios para la recolección de material, tanto de agregados y desechos de material de vidrio.

Guantes de protección: Utilizados en la recolección de residuos de vidrio.

Gafas de protección: Herramienta imprescindible al momento de realizar el triturado y molido del vidrio recolectado, que servirá de protección para los ojos.

Para la ejecución de los respectivos ensayos de laboratorio:

Balanza: Debe tener una capacidad superior a la masa de la muestra más el recipiente de pesaje y una precisión de 0.1 gr será usado en todos los ensayos de laboratorio citados.

Tamices: Son tejidos de alambre y abertura cuadrada, y sus tamaños nominales de abertura pertenecen a las series establecidas por norma. Se usará la serie de tamices establecida para los ensayos de: Granulometría de los agregados, desgaste mediante la máquina de Los Ángeles, equivalente de arena, adherencia agregado – ligante asfáltico, granulometría del filler.

Horno: Con circulación de aire y temperatura regulable para las condiciones de la prueba. Será usado en los siguientes ensayos: Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles, determinación de la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos y finos, adherencia agregado – ligante asfáltico, granulometría del filler, densidad máxima de mezclas asfálticas, preparación de probetas.

Esferas (carga abrasiva): Un juego de esferas de acero de aproximadamente 47 mm de diámetro y de masas diferentes distribuidas en un rango entre 390 y 445 gr usado en la prueba de desgaste mediante la máquina de Los Ángeles.

Matraz: Es un matraz aforado en el que se pueda introducir fácilmente la muestra de ensaye. Debe llevar una marca de calibración que indique el volumen contenido con una precisión de ± 0.1 ml. También puede emplearse un picnómetro. Usado para la determinación de la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos.

Molde y pisón: El molde es de forma tronco-cónica, de 40 ± 3 mm de altura, confeccionado con una plancha metálica. Es una varilla metálica con uno de sus extremos de sección plana y circular. Ambos utilizados para la determinación de la densidad real, la densidad neta, la absorción de agua en áridos finos, y el equivalente de arena.

Probeta graduada: De 30 ± 1 mm de diámetro interior y aproximadamente 400 mm de alto, graduado en milímetros hasta una altura de 380 mm que ayudará para la determinación del equivalente de arena, y la adherencia del agregado con el ligante asfáltico.

Tubos de ensayo de vidrio Pyrex: Manejado en la prueba que determinará la adherencia agregado-ligante asfáltico.

Pinza de madera: Que se usará en la prueba para determinar la adherencia agregado - ligante asfáltico.

Máquina de abrasión: Capaz de sostener al menos 2 pares de cilindro de vaivén y rotarlos alrededor del eje central a 20 rpm, que se operará para determinar la compatibilidad filler – ligante asfáltico.

Manómetro de presión residual: Capaz de medir una presión residual igual o inferior a 30 mm Hg, utilizado asimismo, en la determinación de la densidad máxima en las mezclas asfálticas.

Moldes de compactación: Construidos por una placa, base y collar, el molde debe tener un diámetro interior de 101.6 mm y una altura de 80 mm, necesario para la preparación de probetas.

Extractor: Que sirva para sacar las probetas del molde.

Martillo de compactación: Consiste en una cara circular de 100 mm de diámetro con un peso de 4.515 g y construido de modo de obtener la altura de caída 460 mm.

Sujetador de molde: Consiste en un arco con resorte diseñado para mantener cerrado y fijo el molde en el pedestal durante la compactación.

Maquina Marshall: Aparato eléctrico diseñado para aplicar carga a las probetas durante el ensaye a una velocidad de deformación de 50 mm/min.

Recipientes: Limpios de material resistente, estancos y de capacidad suficiente para contener la muestra de ensaye. Usados en todas las pruebas de laboratorio a ser ensayadas.

1.7.2.4.Procedimiento de aplicación

Para poder llevar a cabo el desarrollo de la investigación es conveniente dividir el procedimiento en tres etapas diferentes.

La primera etapa estará conformada por la recolección y preparación de los materiales necesarios que conforman una mezcla asfáltica, tal es el caso de los agregados grueso, agregado fino, el filler y el betún, además del vidrio que luego del molido correspondiente será usado como arena en la investigación.

En la segunda etapa se realizará la caracterización de los materiales. Para los agregados se empleará dos grupos de trabajo, sin la incorporación del vidrio molido y con la incorporación del vidrio molido, mediante las pruebas de laboratorio descritas anteriormente en base al manual de ensayos de la A.B.C. (Administradora Boliviana de Carreteras). Así mismo se realizará la caracterización correspondiente para el cemento Portland, usado como filler, y el cemento asfáltico utilizado para los posteriores ensayos.

En la tercera etapa, luego de la caracterización y verificación de las aptitudes de los materiales, se procederá a realizar la conformación de las mezclas asfálticas. Para ello se debe considerar la distribución de los áridos, así como los contenidos óptimos de

betún y filler a usar. En cuanto a la distribución de áridos cabe recalcar que la primera mezcla, considerada patrón, estará constituida únicamente por el agregado grueso, agregado fino y filler; por otro lado la segunda mezcla que establecerá el comportamiento del vidrio incorporado, estará constituida por el agregado grueso, agregado fino, y un porcentaje de vidrio molido comprendida entre el 5 - 20% del total de la mezcla, cuyo tamaño máximo no sobrepase los 4.75 mm.

Finalmente, luego de efectuar la distribución adecuada de los materiales se realizará la fabricación en laboratorio de las diferentes mezclas en base a los ensayos establecidos para la conformación del método de diseño Marshall, descrito anteriormente.

1.8. Alcance

En la fase previa de la investigación se realiza la recolección, tratamiento y caracterización de los materiales que conforman la mezcla asfáltica, incluyendo los desechos de vidrio y el filler. El tamaño máximo de los desechos de vidrio a usar luego del proceso de molido es de 4.75 mm. En cuanto a la caracterización de los materiales, éstos comprenden el análisis del comportamiento ante los ensayos prescritos por la normativa, según el "Manual de ensayos para el diseño de carreteras" presentado por la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.).

Posteriormente, se lleva a cabo el diseño de las mezclas asfálticas con la incorporación de dichos componentes, para ello se realiza el diseño de fórmulas de trabajo, y se analiza el comportamiento de las mezclas fabricadas mediante el método de diseño Marshall, ante los ensayos impuestos por normativa en el "Manual de ensayos para el diseño de carreteras". La investigación comprende cinco fórmulas de trabajo, con cinco grupos de tres briquetas cada fórmula (15 briquetas). La primera fórmula estará constituida por la mezcla convencional, posteriormente las otras cuatro fórmulas de trabajo corresponden a la adición de diferentes porcentajes de vidrio molido: 5%, 10%, 15% y 20%.

Finalmente se comparan los resultados obtenidos por las pruebas de laboratorio según el método Marshall, referido a la densidad, estabilidad, fluencia, vacíos y huecos, en la mezcla asfáltica creada con la incorporación de diferentes porcentajes de vidrio molido y la mezcla asfáltica convencional, para poder determinar la posibilidad de su utilización en carreteras.

Por otro lado, el estudio incluirá un análisis económico que permita solventar la factibilidad o no de la reutilización de este residuo como árido en la fabricación de mezclas asfálticas, comparando la mezcla asfáltica convencional con la mezcla asfáltica más la incorporación del porcentaje óptimo de vidrio molido definido en el estudio.

CAPÍTULO II
FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Mezclas asfálticas

2.1.1. Definición de mezclas asfálticas

Una mezcla asfáltica, también denominada aglomerado, en general es una combinación de un ligante hidrocarbonato y agregados minerales pétreos. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla así como el rendimiento de la misma como mezcla terminada para un determinado uso.

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de carreteras, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a la explanada para que sean soportadas por ésta. 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.

Figura 1: Mezcla asfáltica puesta en obra



Fuente: Constructora MECO. Producción y comercialización de mezcla asfáltica (2004).
Recuperado de: Agencia EC MEDIOS

Estas mezclas asfálticas pueden ser en caliente, lo más común, o en frío. Además, las mezclas asfálticas pueden ser confeccionadas en plantas y con los equipos apropiados para esta labor. El proceso de fabricación de las mezclas asfálticas en caliente implican calentar el ligante y los agregados (excepto quizás el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra se realizará a una temperatura muy superior a la ambiente. (Yepes Piqueras, 2014)

2.1.2. Clasificación de mezclas asfálticas

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas:

- a) Por fracciones de agregado pétreo empleado.

Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.

Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.

Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.

Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

- b) Por la temperatura de puesta en obra.

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.

Mezclas asfálticas en frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica, y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

- c) Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica.

Mezclas cerradas o densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.

Mezclas semi-cerradas o semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.

Mezclas abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.

Mezclas porosas o drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20 %.

d) Por el tamaño máximo del agregado pétreo.

Mezclas gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.

Mezclas finas: También llamadas micro aglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

e) Por la estructura del agregado pétreo.

Mezclas con esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.

Mezclas sin esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

f) Por la granulometría.

Mezclas continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

Mezclas discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico. (Padilla Rodriguez, 2004)

Tabla 3: Clasificación de mezclas asfálticas

Parámetro de clasificación	Tipo de mezcla
Fracciones de agregado empleadas	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En frío
	En caliente
Huecos en la mezcla (h)	Cerradas ($h > 6\%$)
	Semicerradas ($6\% < h < 12\%$)
	Abiertas ($h < 12\%$)
	Porosas ($h > 20\%$)
Tamaño máximo del agregado (t máx.)	Gruesas (t máx. > 10 mm)
	Finas (t máx. < 10 mm)
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

Fuente: Padilla Rodríguez, A. Clasificación de mezclas asfálticas (2004). Recuperado de: Mezclas asfálticas (págs. 47). España: Universidad Politécnica de Cataluña.

2.1.3. Propiedades de las mezclas asfálticas

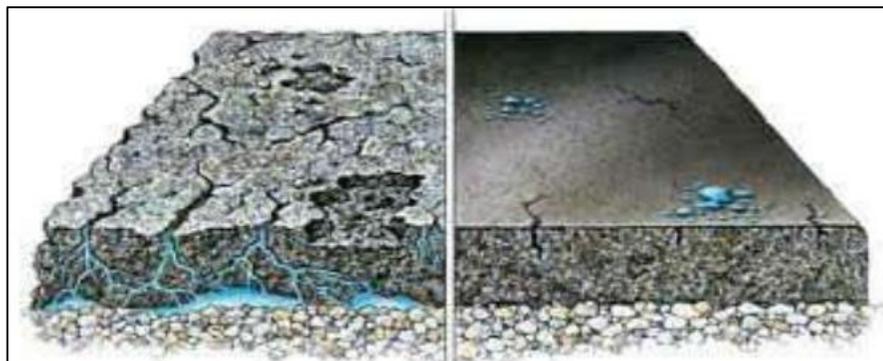
Las mezclas asfálticas como ya hemos visto anteriormente sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales; y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas de las carreteras.

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material. (Ing. Simon Rojas, 2015)

Las cualidades funcionales del firme residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como:

- a) La adherencia del neumático al firme.
- b) Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
- c) El desgaste de los neumáticos.
- d) El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
- e) La comodidad y estabilidad en marcha.
- f) Las cargas dinámicas del tráfico.
- g) La resistencia a la rodadura (consumo de carburante).
- h) El envejecimiento de los vehículos.
- i) Las propiedades ópticas.

Figura 2: Comparación en capas de rodadura



Fuente: Arias, Jorge & Galvis, Wilson. Mezclas asfálticas (2013).
Recuperado de: SlideShare, Mezclas asfálticas

La capa superior de un pavimento es la que debe proporcionar una superficie de rodadura segura, confortable y estética. Como todas las exigencias deseables para una superficie de rodadura no pueden optimizarse simultáneamente hay que equilibrar las propiedades contrapuestas para llegar a las soluciones más satisfactorias.

Los materiales asfálticos proporcionan superficies continuas y cómodas para la rodadura de los vehículos. No obstante, hay que establecer un balance entre la durabilidad, rugosidad, impermeabilidad, y otras características útiles o imprescindibles para el usuario. Por ejemplo, en los países fríos, se han desarrollado mezclas muy impermeables y ricas en mortero. Si estas mezclas no proporcionan la textura adecuada, se recurre a procedimientos ajenos a la propia mezcla como son la incrustación en la superficie de gravillas o al abujardado en caliente. (Marín, 2016)

Tabla 4: Propiedades funcionales de las mezclas asfálticas

Propiedades funcionales de las mezclas asfálticas	
Seguridad	Resistencia al deslizamiento Regularidad transversal Visibilidad (marcas viales)
Comodidad	Regularidad longitudinal Regularidad transversal Visibilidad Ruido
Durabilidad	Capacidad soporte Resistencia a la desintegración superficial
Medio ambiente	Ruido Capacidad de ser reciclado
Trabajabilidad	

Fuente: Marín, Karol. Propiedades del asfalto y mezclas asfálticas (2016). Recuperado de: Proyecto de investigación – Universidad Tecnológica de Panamá (pág. 17)

Tabla 5: Propiedades técnicas de las mezclas asfálticas

Propiedades técnicas de las mezclas asfálticas	
Textura superficial	
Conductividad hidráulica	
Absorción de ruido	
Propiedades mecánicas (relación al tráfico)	Resistencia a la figuración por fatiga Resistencia a las deformaciones plásticas permanentes Módulo de rigidez Resistencia a la pérdida de partículas
Durabilidad	Resistencia al lavado por el agua Resistencia a la fisuración térmica Resistencia a la fisuración por reflexión Resistencia al envejecimiento
Trabajabilidad	Compactibilidad Resistencia a la segregación agregado fino/grueso Resistencia a la segregación agregado/ligante

Fuente: Marín, Karol. Propiedades del asfalto y mezclas asfálticas (2016).
 Recuperado de: Proyecto de investigación – Universidad Tecnológica de Panamá (pág. 18)

2.1.4. Diseño de mezclas asfálticas

En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas: Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado. Existen tres métodos de diseño comúnmente utilizados para determinar las proporciones apropiadas de asfalto y agregado en una mezcla. Ellos son el método Marshall, y método Hveem, y el método Superpave.

Los tres métodos de diseño son ampliamente usados en el diseño de mezclas asfálticas de pavimentación. La selección y uso de cualquiera de estos métodos de diseño de mezclas es, principalmente, asuntos de gustos en ingeniería, debido a que cada método contiene características y ventajas singulares. En el presente estudio sólo se tratará el método Marshall. (UDEP, 2017)

2.1.4.1. Metodología

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

El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la elaboración de la mezcla. El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1 pulg) o menor. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente.

2.1.4.2. Especificaciones de la metodología

El método Marshall usa muestras de ensayo (probetas) de 64 mm (2.5 pulg) de espesor por 102 mm (4 pulg) de diámetro. Una serie de muestras de ensayo, cada una con la misma combinación de agregados pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla asfáltica.

Los dos aspectos principales del método de diseño son: análisis de densidad-vacíos y el ensayo de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior), Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. La Tabla 6 presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la ASTM D 3515.

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios que se discutirán en el presente capítulo. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. El rango de vacíos de aire es de 3% al 5%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (Tabla 7).

Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla. (Crespin Molina, Santa Cruz Jovel, & Torrez Linares, 2012)

Tabla 6: Gradaciones propuestas para mezclas cerradas

Mezclas Cerradas										
Tamaño Máximo Nominal del Agregado										
Aberturas de los tamices	2 pulg (50.0mm)	1 ½ pulg (37.5mm)	1 pulg (25.0mm)	¾ pulg (19.0mm)	½ pulg (12.5mm)	3/8 pulg (9.5mm)	No. 4 (4.75mm)	No. 8 (2.36mm)	No. 16 (1.18mm)	
Gradaciones para Mezclas de Agregados (Grueso, Fino y Filler)										
2 ½" (63 mm)	100	---	---	---	---	---	---	---	---	---
2" (50 mm)	90-100	100	---	---	---	---	---	---	---	---
1 ½" (37.5 mm)	---	90-100	100	---	---	---	---	---	---	---
1" (25.0 mm)	60-80	---	90-100	100	---	---	---	---	---	---
¾" (19.0 mm)	---	56-80	---	90-100	100	---	---	---	---	---
½" (12.5 mm)	35-65	---	56-80	---	90-100	100	---	---	---	---
3/8" (9.5 mm)	---	---	---	---	---	90-100	100	---	---	---
No. 4 (4.75 mm)	14-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85	80-100	---	---	---
No. 8 (2.36 mm)	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	65-100	---	---	100
No. 16 (1.18 mm)	---	---	---	---	---	---	40-80	---	---	95-100
No. 30 (600µm)	---	---	---	---	---	---	35-65	---	---	70-95
No. 50 (300 µm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	---	---	45-75
No. 100 (150 µm)	---	---	---	---	---	---	3-20	---	---	20-40
No. 200 (75 µm)	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10	---	---	9-20
Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla.										
2-7	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12	6-12	7-12	8-12		

Fuente: ASTM D3515 Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures

Tabla 7: Criterios del Instituto de asfalto para el diseño Marshall

Criterios para mezcla del método Marshall	Tránsito liviano Carpeta y base		Tránsito mediano Carpeta y base		Tránsito pesado Carpeta y base	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N (lb)	336 (750)	-	5358 (1200)	-	8006 (1800)	-
Flujo 0.25mm (0.01 pulg)	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% VMA	Ver tabla 8					
% VFA	70	80	65	78	65	75

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, MS 22, Asphalt Institute

NOTAS

¹ Todos los criterios y no solo estabilidad, deben ser considerados al diseñar una mezcla asfáltica de pavimentación. Las mezclas asfálticas en caliente de base que no cumplan estos criterios, cuando se ensayen a 60°C, se consideran satisfactorias si cumplen los criterios cuando ensayen a 38°C, si se colocan a 100 mm o más por debajo de la superficie.

² Condiciones de tránsito

Liviano: Condiciones de tránsito resultan en un ESAL de diseño < 104

Mediano: Condiciones de tránsito en un ESAL de diseño entre 104 y 106

Pesado: Condiciones de tránsito que resultan en un ESAL de diseño > 106

³ Los esfuerzos de compactación en el laboratorio deberán aproximarse a la densidad máxima obtenida en el pavimento bajo el tránsito.

⁴ Los valores de fluencia se refieren al punto en donde la carga comienza a disminuir.

⁵ Cuando se esté calculando el porcentaje de vacíos, deberá permitirse cierta tolerancia en la porción de cemento asfáltico perdida por absorción en las partículas de agregado.

Tabla 8: Porcentaje mínimo de VMA

Tamaño máximo en mm Porcentaje		VMA mínimo, por ciento		
		Vacíos de diseño, por ciento ³		
mm	pulg	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	½	13.0	14.0	15.0
19.0	¾	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50.0	2.0	9.5	10.5	11.5
63.0	2.5	9.0	10.0	11.0

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, MS 22, Asphalt Institute

NOTAS

¹ Especificación norma para tamaño de tamices usados en pruebas AASHTO M 92 (ASTM E 11).

² El tamaño máximo nominal de la partícula es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% del material.

³ Interpole el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentren entre los que están listados.

2.1.4.3.Descripción de diseño Marshall

A continuación se presenta una descripción general de los procedimientos seguidos en el diseño Marshall de mezclas. El procedimiento completo y detallado que se debe ser seguido se encuentra en la norma AASHTO T 245 (o ASTM D1559).

Como ya se discutió en el capítulo de materiales, diferentes agregados y asfaltos presentan diferentes características. Estas características tienen un impacto directo sobre la naturaleza misma le pavimento. El primer paso en el método de diseño, entonces, es determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, etc.) que debe tener la mezcla de pavimentación y seleccionar un tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

Selección de muestras de material

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras del asfalto y del agregado que va a ser usados en la mezcla de pavimentación. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las el asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple: los datos extraídos de los procedimientos de diseño de mezclas determinar la fórmula o “receta” para la mezcla de pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en el laboratorio tienen características idénticas a los ingredientes usados en el producto final.

Preparación del agregado

Los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar exactamente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico, efectuar un análisis granulométrico, etc. Los requisitos que deben cumplir los agregados se detallan a continuación:

Agregado grueso:

Este material debe consistir en grava y/o gravilla de buena calidad triturada (Retenidos en la malla de 4.75 mm) y mezclada de manera que el producto obtenido corresponda a uno de los tipos de granulometría estipulados y llene además los requisitos generales siguientes.

Tabla 9: Requisitos en agregado grueso

Ensayo	Normativa
Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles. (ASTM E 131 AASHTO T96-99). A0511	> 40%
Caras fracturadas en agregados gruesos. A0508	> 75%
Método de los sulfatos para determinar la desintegración. (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516	< 12%
Adherencia agregado – ligante asfáltico. (ASTM D 1664). A0701	> 95%

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, Asphalt Institute

Agregado fino:

Este material está formado por arenas naturales, arena de piedra quebrada cernida, o su combinación y deberá tener una granulometría que (material que pasa la malla 4.75 mm), al combinarse con otras fracciones en la proporción adecuada, la mezcla resultante puede satisfacer la granulometría requerida según ASTM D3515 (Tabla 6), y que llene además los requisitos generales siguientes.

Tabla 10: Requisitos en agregado grueso

Ensayo	Normativa
Equivalente de arena. (ASTM D 2419 AASHTO T176-00). A0509	> 45%
Método de los sulfatos para determinar la desintegración (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516	< 12%
Adherencia agregado – ligante asfáltico (Riedel – Weber). A0118	> Grado 1

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, Asphalt Institute

Preparación de las muestras (probetas) 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 contenidos 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 muestras son preparadas de la siguiente manera:

- El asfalto y el agregado se calientan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los 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 la mezcla al golpearla.
- Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada briketa reciben el mismo número de golpes.

Figura 3: Diseño de briquetas según método Marshall



Fuente: Laboratorio de asfaltos. Diseño de mezclas asfálticas. (2017). Recuperado de: Laboratorio nacional de materiales y modelos estructurales de la Universidad de Costa Rica

Procedimiento de ensayo Marshall

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

Determinación del peso específico total: El peso específico total de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de densidad-vacíos. El peso específico total se determina usando el procedimiento descrito en la norma AASHTO T 166.

Ensayo de estabilidad y fluencia: El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga que ocurre en la mezcla. El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

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

Valor de estabilidad Marshall: El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente.

Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador del cuadrante. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de estabilidad Marshall. Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor.

Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, éste no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad.

Valor de fluencia Marshall: La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

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 tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito. (Homes & Sandrea, 2013)

2.2. Gestión de residuos

Gestión de residuos se llama a todo el proceso que engloba las actividades necesarias para hacerse cargo de un residuo. La gestión de residuos comienza con la recogida de los mismos, su transporte hasta las instalaciones preparadas y su tratamiento intermedio o final. Este tratamiento puede ser el aprovechamiento del residuo o su eliminación. En los últimos años se ha incrementado el interés para que esta actividad genere el menor riesgo para la salud y el medio ambiente.

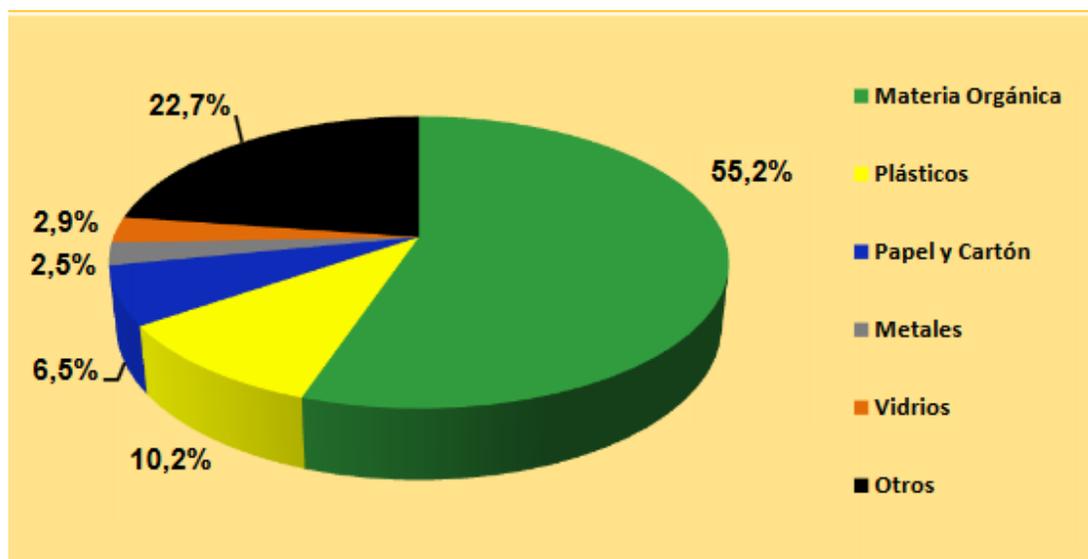
Hay diversos tipos de residuos sólidos, como los que se generan en las ciudades (domésticos, residenciales, institucionales o comerciales), agrícolas o industriales (sectores productivos, industrias, polígonos industriales, sanitarios, etc.). Los principales residuos son producidos por la actividad humana. (Abarca Guerrero, 2016)

Actualmente, la gran mayoría de los países se encuentran muy lejos del objetivo “residuo cero”. Según datos estimados por la OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos), en el mundo se generan más de 10000 millones de toneladas de residuos cada año (Organisation for Economic Cooperational and Development, 2017). Solo en Latinoamérica se generan casi 160 millones de toneladas (Rebossio, 2012), colaborando Bolivia con más de 2 millones de toneladas de residuos al año.

2.2.1.1. Generación de residuos en Bolivia

En nuestro país, cerca de los 2 millones de toneladas de basura que se generan, el 90% son depositadas en botaderos a cielo abierto. El 37% de los botaderos están ubicados en riberas de ríos y otros lugares como lagunas y fuentes de agua que privan a la población del acceso a este recurso. Además, del 100% de la basura, el 55,2% es materia orgánica, el 22,1% es reciclable y el 22,7% son residuos que no son aprovechables. Entonces, estamos hablando que si se realiza una gestión integral de los residuos sólidos, se liberará más del 70% de desechos que sean depositados en los rellenos sanitarios.

Figura 4: Bolivia, composición media de los residuos sólidos



Fuente: Entidades municipales de aseo urbano de Bolivia. Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en Bolivia (2011). Recuperado de: Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (pág. 70)

Figura 5: Tarija, potencial de residuos sólidos generados en diferentes municipios (Ton/día)

Municipio	Generación total urbana	RSO	Plástico	Papel y Cartón	Metales	Vidrios
Tarija	119,88	73,13	7,42	7,24	2,75	2,40
Padcaya	1,50	0,83	0,15	0,10	0,04	0,04
Bermejo	15,38	8,49	1,57	1,00	0,38	0,45
Yacuiba	64,67	35,70	6,60	4,20	1,62	1,88
Caraparí	1,21	0,67	0,12	0,08	0,03	0,04
Villamontes	11,74	6,48	1,20	0,76	0,29	0,34
Villa San Lorenzo	1,65	0,91	0,17	0,11	0,04	0,05
El Puente	1,20	0,66	0,12	0,08	0,03	0,03
Entre Ríos	0,74	0,41	0,08	0,05	0,02	0,02

Fuente: Gestión de residuos sólidos en Bolivia (2011). Recuperado de: Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (pág. 69)

2.2.1.2. Generación de residuos en Tarija

Actualmente Tarija genera un promedio de 140 toneladas de basura por día, de las cuales el 60% es orgánico y el resto inorgánico, es decir plásticos, vidrio, papeles y metales. Al año se estima un recojo total de 38.226.06 toneladas de basura, la producción de residuos por fuente mensual va de la siguiente manera: áreas periurbanas 9,5%, mataderos 2,9%, hospitales 0,38%, domicilios nocturnos 12,5%, domicilios diurnos 64,9%, mercados 8,1%, y otros 1,9%.

Así mismo, algo que no se puede dejar de reconocer, es que la ciudad de Tarija es una de las más limpia de Bolivia, pese a que una gran mayoría de los ciudadanos, se encuentran mal acostumbrados al momento de desechar el desperdicio por más pequeño que sea, como bolsas y vasos de plástico de cualquier producto que se consume en las calles, los mercados o en el transporte público.

2.2.2. Marco normativo

El potencial contaminante de los residuos y la necesidad permanente de encontrar nuevos sitios para su disposición final, motivaron a una reflexión internacional sobre la necesidad de reducir la cantidad de residuos que van a disposición final, ya sea mediante la prevención en la generación y/o la reducción de su peligrosidad o mediante su aprovechamiento para evitar su disposición final.

2.2.2.1. Marco normativo internacional

A nivel internacional existen diversos tratados relacionados al medio ambiente, sin embargo los referidos específicamente a residuos sólidos son pocos, de los cuales en Bolivia no se tienen reportes acerca de los avances y cumplimiento.

A continuación, se mencionan los más sobresalientes:

Convenio de Basilea

Su finalidad es reducir el volumen de los intercambios de residuos, estableciendo sistemas de control de las exportaciones e importaciones de residuos peligrosos así como su eliminación. Este convenio fue adoptado por Bolivia el 22 de marzo de 1989 y ratificado el 15 de noviembre de 1996.

Agenda 21

La Agenda 21, de la Conferencia mundial sobre medio ambiente y desarrollo de Río de Janeiro, de 1992, se constituye en una guía para el desarrollo sostenible a través de una gestión ecológicamente racional de los residuos peligrosos y municipales, de la cual se plantean las siguientes estrategias a desarrollar:

Reducción al mínimo de los desechos.

Aumento al máximo de la reutilización y el reciclado ecológicamente racional de los desechos.

Ampliación del alcance de los servicios.

Con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo, brindado a través del Proyecto Capacidad 21, se impulsaron acciones importantes como la elaboración de los planes departamentales de desarrollo económico y social, también conocidos como Agendas 21 departamentales, precisamente por haber sido concebidas de acuerdo a la nueva concepción del desarrollo sostenible e incluir los criterios de gestión de la Agenda 21 en los programas y subprogramas de dichos planes departamentales, en base a los cuales debían de ejecutarse todos los proyectos de desarrollo.

Protocolo de Kyoto

El Protocolo de Kyoto, Japón, sobre el cambio climático establecido por el programa de Naciones Unidas y de vigencia hasta el año 2022, tiene como objetivos la elaboración de políticas y medidas para reducción de emisiones de dióxido de

carbono, de acuerdo a las circunstancias nacionales de un determinado país, una de ellas se relaciona a la limitación y/o reducción de las emisiones de metano mediante su recuperación y utilización en la gestión de los desechos así como en la producción, el transporte y la distribución de energía.

Bolivia, reconoce al Programa Nacional de Cambios Climáticos, mediante DS N° 25030 del 27 de abril de 1998, como el ente operativo encargado de cumplir los compromisos técnicos de Bolivia ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, el cual ha desarrollado varios estudios y actividades, entre los cuales destaca los inventarios de emisiones por fuentes y absorción por sumideros de gases de efecto invernadero de origen antropogénico de Bolivia, para los sectores de energía, agricultura, cambio en el uso de la tierra y actividades forestales y residuo para el año 2004.

Objetivos del Milenio

La Cumbre del Milenio, celebrada en septiembre de 2000, reunió a líderes mundiales que aprobaron la declaración del milenio de las Naciones Unidas, en la que comprometieron a sus naciones a una nueva asociación mundial para reducir la pobreza, mejorar los niveles de salud y promover la paz, los derechos humanos, la igualdad de género y la sostenibilidad ambiental.

Los Objetivos del Milenio (ODM) para el año 2015, son metas cuantificadas y cronológicas, que las Naciones Unidas han fijado para luchar contra la pobreza extrema, a la vez que se promueve la igualdad de género, la educación y la sostenibilidad ambiental.

El objetivo N°7, establece garantizar la sostenibilidad del medio ambiente, para lo cual plantea cumplir con las siguientes metas:

Meta 9: Incorporar los principios de desarrollo sostenible en las políticas y los programas nacionales; invertir la pérdida de recursos del medio ambiente.

Meta 10: Reducir a la mitad para el año 2015 el porcentaje de personas que carecen de acceso sostenible al agua potable y a los servicios básicos de saneamiento.

Meta 11: Mejorar considerablemente la vida de por lo menos 100 millones de habitantes de tugurios para el año 2020.

2.2.2.2. Marco normativo nacional

En Bolivia se han desarrollado algunos instrumentos normativos tales como la Ley de Medio Ambiente N° 1333 y su reglamento de gestión de residuos sólidos y reglamento para actividades con sustancias peligrosas. La implementación de estos instrumentos fue débil debido a la falta de políticas de Estado y de una instancia nacional que pueda liderar, promover y organizar su implementación y cumplimiento.

Con la Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia, se da apertura a un nuevo escenario para el desarrollo de la gestión integral de residuos sólidos, puesto que establece competencias para los diferentes niveles de Estado. (Viceministerio de Medio Ambiente y Agua, 2011)

Por otro lado, además, fue promulgada la Ley de Gestión Integral de Residuos que establece responsabilidades y sanciones sobre el manejo de los residuos sólidos en los diferentes niveles de Gobierno. La ley sancionada tiene como principio básico el implementar la política general y el régimen jurídico de la gestión integral priorizando la reducción de generación de residuos, su aprovechamiento y la disposición final ambientalmente segura.

También legisla sobre la separación y clasificación, es decir, los productores y distribuidores se deben hacer responsables de la gestión de los residuos generados por el consumo de los productos. Este régimen aplica inicialmente, por ejemplo, a las botellas de vidrio, botellas pet, baterías, etc. (Corz C. , 2015)

Tabla 11: Bolivia, Cronología del marco legal para el sector de residuos sólidos

Año	Marco Legal Promulgado
1978	Mediante Decreto Ley N° 15628, del 18 de julio de 1978, se aprueba el Código de Salud, el cual dispone la competencia de la Autoridad de Salud sobre la temática de los Residuos Sólidos.
1982	Se aprueba el Reglamento de Saneamiento Ambiental mediante Decreto Supremo N° 18886 del 15 de marzo de 1982, en el cual se introducen varios aspectos relacionados con el manejo de Residuos Sólidos.
1991	Se promulga el Decreto Supremo N°22965, que establece el Reordenamiento del Sector de Saneamiento Básico en Bolivia, con la descentralización de los servicios básicos en las nueve prefecturas del país, mediante la creación de las Unidades de Saneamiento Básico. Entre las funciones principales están la formulación de planes y programas departamentales de ampliación de cobertura de saneamiento básico, así como la implementación de políticas, estrategias y prioridades nacionales y concentrarlas en planes operativos para la excretas, gestión de residuos sólidos y control de la contaminación ambiental
1992	Se aprueba la Ley N° 1333, Ley del Medio Ambiente, la misma señala que: <i>es de prioridad nacional, la promoción de acciones de saneamiento ambiental, garantizando los servicios básicos y otros, a la población urbana y rural en general.</i>
1995	Se prueban los Reglamentos de la Ley N° 1333, entre los cuales se incluye el Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos, donde se establece que el Gobierno Municipal es responsable de la gestión.
1997	En la Ley N° 1788, Ley de Organización del Poder Ejecutivo (LOPE), de septiembre de 1997, se crea el Ministerio de Vivienda y Servicios Básicos con atribuciones en materia de servicios básicos, para formular, ejecutar y controlar políticas y normas destinadas al desarrollo e instalación de servicios básicos.
1999	Se aprueba la Ley de Municipalidades N° 2028, reconociendo a la Municipalidad como una entidad autónoma de derecho público, con personalidad jurídica y patrimonio propio que representa institucionalmente al Municipio, forma parte del Estado y contribuye a la realización de sus fines. Entre sus funciones están: <i>regular, fiscalizar y administrar directamente, cuando corresponda, los servicios de aseo, manejo y tratamiento de Residuos Sólidos.</i>
2000	Se aprueba la Ley de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario N°2066, que en su artículo N°3, define al Saneamiento Básico como los Servicios de: agua potable, alcantarillado sanitario, disposición de excretas, residuos sólidos y drenaje pluvial.
2000	El sistema de regulación sectorial para saneamiento básico se ha establecido con la creación de la Superintendencia de Saneamiento Básico (SISAB) a través de la Ley N° 2066. Aunque en esta Ley no se definen las atribuciones de la SISAB para regular el subsector de residuos sólidos, permite diseñar un modelo de regulación para este subsector y establecerlo mediante una Ley específica.
2003	Se promulga la Ley N° 2446, de Organización del Poder Ejecutivo y su correspondiente Reglamento, que reconoce plena facultad al Ministro de Servicios y Obras Públicas y al Viceministro de Servicios Básicos, en el subsector de Residuos Sólidos para proponer reglamentos e instructivos para la provisión de los servicios de residuos sólidos, entre otros.
2009	Se promulga la nueva Constitución Política de Estado que establece un Estado basado en el respeto e igualdad entre todos, con principios de soberanía, dignidad, complementariedad, solidaridad, armonía y equidad en la distribución y redistribución del producto social, donde predomine la búsqueda del vivir bien. Se establecen competencias privativas, exclusivas y compartidas para la protección del medio ambiente y política de servicios básicos, dentro de los cuales se encuentran los residuos sólidos.
2009	Mediante Decreto Supremo N° 29894, se aprueba la Organización del Estado Plurinacional de Bolivia y con ello se da lugar a la creación de la Dirección General de Gestión Integral de Residuos Sólidos dependiente del Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico del Ministerio de Medio Ambiente y Agua.
2009	Mediante Decreto Supremo N°0071, se crea la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico. De acuerdo al Artículo N° 20, fiscaliza, controla, supervisa y regula las actividades de Agua Potable y Saneamiento Básico.
2010	Se promulga la Ley Marco de Autonomías y Descentralización Andrés Ibáñez, Ley N°031. Tiene por objeto regular el régimen de autonomías por mandato del Artículo 271 de la Constitución Política del Estado y las bases de organización territorial del Estado. Establece competencia exclusiva de diseño, aprobación y ejecución del régimen general y competencias privativas para el diseño de políticas. Así mismo establece las competencias compartidas entre los diferentes niveles de Estado para la temática de residuos sólidos.
2015	Ley de la Madre la cual tiene por objeto reconocer los derechos de la Madre Tierra, así como las obligaciones y deberes del Estado Plurinacional y de la sociedad para garantizar el respeto a estos derechos.

Fuente: Gestión de residuos sólidos en Bolivia (2011). Recuperado de: Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (pág. 43-44)

2.2.2.3.Marco normativo departamental

En el departamento de Tarija una de las deficiencias del sector, se relaciona con la disponibilidad de un marco legal que regule la prestación del servicio de aseo municipal. De los 9 municipios, sólo Tarija y Yacuiba cuentan con esta normativa.

La ciudad de Tarija cuenta con el reglamento del servicio de aseo urbano de Tarija (OM 045/1995), el reglamento de gestión de residuos de establecimientos de salud (OM 127/2007), reglamentos de gestión de escombros (que hasta principios del año 2011, estaba en proceso de aprobación por parte del H. Consejo Municipal).

La ciudad de Yacuiba cuenta con un reglamento para la prestación del servicio de aseo urbano.

Referente a ordenanzas municipales la disponibilidad también es mínima, en 5 municipios (incluyendo los dos anteriores) se promulgaron estos instrumentos particularmente orientados a la aprobación de tasas de aseo. (Viceministerio de Medio Ambiente y Agua, 2011)

Tabla 12: Tarija, municipios que cuentan con reglamentos y ordenanzas municipales relacionadas al manejo de residuos sólidos

Nº	Municipio	Nº Ordenanza	Reglamento /Ordenanza Municipal
1	Tarija	127/2007	Reglamento para la Gestión de Residuos Sólidos de Establecimientos de Salud
		045/1005	Reglamento del servicio de Aseo Urbano de Tarija
		En elaboración	Reglamentos de gestión de escombros
		En elaboración	Reglamento de cobros de tasas e higiene y seguridad laboral.
2	Yacuiba	Sin dato	Reglamento para el Servicio de Aseo Urbano.
3	Caraparí	Sin dato	Sin dato
4	Bermejo	010/98	Ordenanza "Estructura de Tasas de Aseo Urbano de la Ciudad de Bermejo".
5	Entre Ríos	06/2009	Ordenanza "Estructura de Tasas de Aseo Urbano de la Ciudad de Entre Ríos".

Fuente: Gestión de residuos sólidos en Bolivia (2011). Recuperado de: Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (pág. 87)

A pesar de ello, en el departamento de Tarija paulatinamente se crean programas y proyectos en cuanto a una buena gestión de residuos. El objetivo de éstos es educar y hacer el aprovechamiento de los residuos en los domicilios, efectuando la recolección selectiva en origen, con el consiguiente aprovechamiento, que pueda servir para la reutilización de sólidos en diferentes proyectos. (Pascual, 2016)

2.2.3. Incorporación de residuos en mezclas asfálticas

Desde sus comienzos en la década de los sesenta, la incorporación de residuos en mezclas bituminosas ha sido un desafío que ha permitido impulsar el desarrollo de procesos constructivos más sostenibles. En este ámbito, encontramos que tanto la función desempeñada por los diferentes residuos utilizados (áridos, filler, aditivos o fibras), como la variedad en la tipología de éstos (aceros, polvo de neumáticos, pavimentos reciclados entre otros), ha sido bastante amplia.

Dentro de los componentes de una mezcla asfáltica, el más abundante, y por tanto, el más consumido y el que mayor oportunidad de consumo de residuos puede ofrecer, son los áridos. Al tratarse de recursos naturales procedentes de una fuente agotable como son las canteras, su consumo excesivo implicaría futuros problemas de escasez, así como un encarecimiento significativo del material. La sustitución total o parcial de los áridos (así como del filler) utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas por residuos es una solución muy a tener en cuenta para paliar este problema. Debido a ello, se pueden encontrar numerosas experiencias cuyo objetivo ha sido verificar la aptitud de algunos residuos para poder desempeñar este papel. Algunas de estas experiencias han tenido mayor aceptación, convirtiéndose en técnicas contrastadas, como pueden ser los casos ya comentados del empleo de polvo de neumático o el reciclado de firmes.

2.2.3.1. Polvo de neumático fuera de uso (PNFU)

Dentro de las experiencias con mezclas realizadas con este residuo, podemos encontrar dos técnicas bien diferenciadas: la vía seca (que consiste en añadir directamente el polvo de neumático a la mezcla como parte de los áridos más finos) y la vía húmeda (que consiste en modificar previamente el betún con los residuos de PNFU, y después realizar la mezcla de éste con los áridos y el filler). En la vía seca (que es la que más cantidad de residuo consume), el tamaño del polvo utilizado en las diferentes experiencias conocidas varía entre 0 y 6,4 mm, siendo el porcentaje habitual de áridos finos sustituidos entre el 1 y el 3%.

La adición de éste residuo provoca un aumento de la demanda del contenido de betún de la mezcla en torno a un 10 - 20%. Existen estudios que han demostrado que la adición por esta vía provoca una reducción en la deformación permanente de la mezcla, y una reducción del ruido de rodadura de los vehículos. Por su parte, en la vía húmeda (que es la más estudiada), el tamaño del PNFU utilizado varía en el rango 0,15 - 0,6 mm y su porcentaje de adición suele estar en torno al 18 - 22% sobre el peso del betún. Los numerosos estudios desarrollados con esta técnica revelan mejoras sustanciales en el comportamiento ante roderas y fatiga de las mezclas, así como un alargamiento de la vida del pavimento.

Imagen 1: Polvo de neumático



Fuente: Caucho sintético (2017). Recuperado de: Recycled Rubber

2.2.3.2. Material reciclado procedente del fresado de capas de firme (RAP)

Son tantas las experiencias desarrolladas con este residuo en la fabricación de mezclas asfálticas, que su empleo se ha convertido en una técnica totalmente depurada y regularizada mediante manuales y textos normativos. Las modalidades de reciclado de firmes atienden a si éste se realiza in situ o en central, en frío o en caliente, y con cemento o con emulsión. De todas las combinaciones posibles, podemos decir que la que coincide más estrictamente con la reutilización de residuos como sustitución de áridos en mezclas bituminosas, es el reciclado en caliente en central. Esta técnica es capaz de producir mezclas asfálticas con un cierto porcentaje de áridos reciclados de una carretera deteriorada como materia prima. Este porcentaje puede variar desde el 0% hasta casi el 70% en función del tipo de planta de fabricación utilizada, y los tamaños de áridos sustituidos variarán en todo el huso. Los resultados obtenidos por estas experiencias muestran que las mezclas bituminosas recicladas en central se aproximan a las mezclas bituminosas convencionales en términos de costes de fabricación, puesta en obra y control de calidad, pero son mucho más económicas en términos ambientales y de consumo de materias primas.

Imagen 2: Material fresado de capas de firme



Fuente: Tecnologías verdes para la ingeniería vial (2017). Recuperado de: Structuralia

2.2.3.3. Escorias de acero

La forma angular, dureza y rugosidad superficial que poseen las escorias de acero las convierten en un material muy susceptible de ser utilizado como sustitutivo de los áridos gruesos que componen una mezcla bituminosa. La alta porosidad de este material hace que la demanda de betún de la mezcla se incremente debido a la absorción, por ello a veces es conveniente combinar su empleo con fibras para evitar el escurrimiento del ligante. Existen estudios que han demostrado la mejora de las propiedades de la mezcla ante la acción del agua y la fatiga, cuando a éstas se incorporan escorias de acero, con filler calizo y un betún modificado con polímeros.

Otro estudio más reciente desarrollado en China, ha demostrado las mejoras en cuanto a resistencia a roderas y fisuración a bajas temperaturas, conseguidas por una mezcla con unos 62% de escoria de acero como áridos. Otra investigación ha demostrado las ventajas de su empleo en climas de bajas temperaturas, ya que las escorias de acero conservan mejor el calor que los áridos naturales. En España, gracias a las acerías situadas en el norte del país, también se dispone de ciertas cantidades de este residuo, lo que se ha permitido desarrollar diversas experiencias en esta zona.

Imagen 3: Escoria de acero



Fuente: Escoria negra, Vanesa Ortega (2017). Recuperado de: EFE Verde

2.2.3.4. Residuos de plástico

Al igual que ocurre con el polvo de neumático, los residuos de plástico pueden ser utilizados bien para sustituir parte de los áridos de una mezcla bituminosa, o bien, como modificador del ligante. Uno de los primeros estudios desarrollados con este material demostró la mejora de la resistencia a fatiga, así como de la trabajabilidad de la mezcla tanto a altas como a bajas temperaturas. Cuando estos se emplean para sustituir a los áridos adicionados en forma de gránulos en unas proporciones del 30%, y con tamaños entre 2,36 y 5 mm, reducen la densidad de la mezcla en un 16% y aumentan tanto la estabilidad Marshall como la resistencia a tracción indirecta. Estudios realizados con tamaños más pequeños entre 0,30 y 0,92 mm, y un porcentaje de adición del 15% han demostrado mejorar la resistencia de las mezclas ante las roderas y la acción del agua. En este caso las mezclas requerían un 20% más de ligante. La fabricación y puesta en obra de mezclas con residuos de plásticos no requiere modificaciones de la planta ni de la maquinaria empleada.

Imagen 4: Residuos de plástico



Fuente: Granza Plast (2017) Recuperado de: Plásticos reciclados

2.2.3.5. Residuos de vidrio

Las experiencias realizadas con este residuo no son recientes, en New York y Norwalk (Connecticut, EE.UU) a finales de los años ochenta ya se fabricaron mezclas que incorporaban un 20% de desperdicios de vidrio (glasphalt). En esta investigación se demostró la importancia de la utilización de un agente estabilizador como la cal para evitar los desprendimientos de áridos y vidrio de la mezcla. Fueron dichos problemas de desprendimiento de áridos los que llevaron a realizar un estudio que permitiera conocer las cantidades máximas de residuos a incorporar en la mezcla.

Así, los tamaños de adición de este residuo en mezclas bituminosas han de ser de 4,75 mm como máximo (para evitar el pinchazo de los neumáticos), y en proporciones del 10 - 15%. Por otra parte, la adición de este residuo disminuye el contenido de ligante de la mezcla, y por tanto abarata su coste. Existen estudios que han demostrado que su aportación a las mezclas mejora la resistencia al deslizamiento. A la hora de ejecutar las obras, puede emplearse la misma maquinaria que para las mezclas convencionales.

Imagen 5: Residuos de vidrio



Fuente: Vidrio molido, Coahuila (2017). Recuperado de: EFE Verde

2.2.3.6. Residuos de construcción y demolición (RCD)

Se trata de uno de los residuos de mayor producción, y con unas características muy buenas para poder ser empleado como árido en todas las fracciones. A ello hemos de sumarle, el esfuerzo de las administraciones por implantar la reutilización y reciclaje de estos residuos, ejemplo de ello en España son el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006, o su segunda parte 2007-2015, contemplada como el anexo 6 del Plan Nacional Integrado de Residuos.

Fruto de estas circunstancias es la reutilización de áridos procedentes de los RCD en la fabricación de mezclas asfálticas. Dada la porosidad del residuo, las mezclas fabricadas con ésta poseen una densidad inferior (mayor cantidad de huecos/mezcla) y su contenido de ligante es superior. Los estudios llevados a cabo con este residuo han demostrado la viabilidad de su utilización en mezclas bituminosas, pero teniendo en cuenta que las propiedades mecánicas de éstas son inferiores a las convencionales (aunque cumpliendo la normativa).

Imagen 6: RCD como áridos reciclados



Fuente: Mancomunidad de Tentudía, Residuos de demolición (2017). Recuperado de: Jornadas de gestión de residuos, EFE Verde

2.2.3.7. Cenizas volantes:

La utilización de cenizas volantes en mezclas bituminosas como filler, además del consumo de un residuo, supone una mejora en la trabajabilidad de la mezcla (ideal para trabajos a bajas temperaturas) y una reducción considerable de la energía de fabricación y puesta en obra.

Se demostró la posibilidad de la fabricación de mezclas con cenizas volantes a 110°C y su compactación a 85°C, no afectando la adición de este residuo al contenido de betún de la mezcla, y cumpliendo todas las prescripciones establecidas por la normativa.

Otros estudios han demostrado la posibilidad de su utilización como sustitutivo de las fracciones más finas del árido de las mezclas (tamaños máximos de 4,75 mm), siendo los resultados obtenidos para el ensayo Marshall y sensibilidad al agua satisfactorios a niveles de sustitución del 15-20%. Investigaciones más recientes han definido mejor el comportamiento de las mezclas con este residuo, realizando ensayos de sensibilidad al agua y resistencia a deformaciones plásticas, y estudiando la posible toxicidad de su aplicación.

Imagen 7: Cenizas volantes



Fuente: INCOSER. Cenizas volantes (2013). Recuperado de: Maritime Works

2.2.3.8. Residuos de mármol

El 30% en peso de los bloques de mármol termina convirtiéndose en un residuo tras su manufactura. De ese 30%, el 40% se conservan en forma de rocas fragmentadas. Un estudio desarrollado en Turquía, puso de manifiesto la viabilidad de reutilización de dicho material en la fabricación de mezclas bituminosas para capas intermedias de tráfico medio. Por su parte, otro estudio, demostró la posibilidad de reutilizar los residuos en forma de polvo como filler, adicionados sin tratamiento alguno, y ofreciendo resultados satisfactorios ante deformaciones plásticas.

Imagen 8: Residuos de bloques de mármol



Fuente: Focus piedra. Mármol (2014). Recuperado de: Novelda digital

2.2.3.9. Escorias fundidas de residuos de hospital

Durante una investigación desarrollada en Malasia, se consiguió utilizar escorias obtenidas a partir de residuos de hospital como áridos en mezclas bituminosas. El proceso de obtención del residuo consiste en recuperar las cenizas procedentes de la incineración de los residuos de hospital, y fundirlas en un horno a 1200°C, para posteriormente dejarlas enfriar a temperatura ambiente. El resultado son unas escorias de tamaño máximo 1,3 cm, con una densidad de 1,03 gr/cm³, una absorción en torno a 0,60% y un desgaste de Los Ángeles en torno a 25.

Se realizó también un estudio sobre el contenido de metales pesados en el material, dando como resultado valores inferiores al máximo permitido por la normativa, concluyendo por tanto que dicha escoria, no se trata de un material peligroso. Los ensayos de carreteras desarrollados con ésta no fueron demasiado exhaustivos, obteniéndose un porcentaje óptimo de betún de 5,3%, y el cumplimiento de los valores Marshall para una mezcla de capa de rodadura en tráfico medio. (Belmonte Sanchez, 2009)

Imagen 9: Residuos de hospitales



Fuente: Milenio. Desechos de hospitales (2017). Recuperado de: Genius Intraocular

2.3. El vidrio y su impacto ambiental

El vidrio es un material inorgánico duro, frágil, transparente y carente de una estructura cristalina desde el punto de vista cristalográfico, por lo que se le califica como amorfo. Se encuentra en la naturaleza, aunque también puede ser producido por el ser humano. El vidrio artificial ofrece una amplia versatilidad de usos, tales como ventanas, lentes, envases, botellas y una gran variedad de productos. Se obtiene a unos 1.500 °C a partir de arena de sílice (SiO_2), carbonato de sodio (Na_2CO_3) y caliza (CaCO_3).

A efectos del desarrollo de esta investigación, se ha distinguido entre los siguientes tipos de vidrio, ya que el tratamiento que se les da al final de su vida útil es muy diferente:

- a) Vidrio procedente de envases.
- b) Otros tipos de vidrio: Vidrio empleado en edificación, vidrio laminado, otros (vasos, copas, lámparas, monitores de TV y PC, etc.).
- c) Residuo del proceso de reciclado del vidrio.

Este material, en cualquiera de sus formatos, resulta muy resistente, sin embargo es frágil porque con una simple caída puede quebrarse, para los componentes naturales del suelo es una tarea titánica transformarla. (QUARRY, 2017)

Aunque todo se degrada eventualmente, la diferencia radica en el tiempo que tardan los agentes biológicos en descomponerlas en químicos naturales y cómo éstos afectan el medio ambiente. Por eso es importante darse cuenta de que lo que constituye basura para la mayoría de las personas, cuya disposición final en un vertedero pareciera ser suficiente, tiene en realidad un impacto grande, muy negativo y lamentablemente duradero en nuestro planeta. (Wolf, 2009)

A continuación se presentan algunos de los materiales más comunes usados en la vida cotidiana de cada persona.

Figura 6: Degradación en el medio ambiente de algunos materiales



Fuente: Aguilar N. (2015), Cuidado del medio ambiente. Recuperado de: Blog, Pedagogía ambiental

2.3.1. Reciclaje del vidrio

El vidrio tiene tres características que hacen de él un material excelente para ser reciclado. Uno es que puede ser reciclado el 100% del producto, puede ser reciclado infinidad de veces y además mantiene todas sus propiedades.

Aparte de esto, los beneficios para el medio ambiente son muy importantes:

Ahorro de energía. Utilizando vidrio triturado de botella (calcín) en vez de material virgen, se ahorra entre un 20 y un 30% en energía. El punto clave del ahorro energético estriba en que, en la fabricación a partir de vidrio reciclado o calcín, el punto de fusión del material es menor y por tanto también lo es la energía necesaria. (Reciclar 1 botella equivale al consumo energético de 1 bombilla de 110 vatios durante 4 horas; reciclar 3 botellas al consumo de un servicio de lavavajillas; y 4 botellas al de un frigorífico durante un día).

Ahorro de las emisiones de gases de efecto invernadero. Utilizando calcín de vidrio las emisiones de carbono se reducen entre un 20 y un 50%. Por cada tonelada de vidrio reciclado se evita la emisión de 200 kg de CO₂.

Mejora de la calidad del aire y del agua al reducir su contaminación. La contaminación del aire se disminuye en un 20%. Por cada 10% de vidrio reciclado se reduce en un 8% la emisión de partículas a la atmósfera, en un 10% de óxidos sulfúricos y en un 4 % de óxido de nitrógeno.

Ahorro de materias primas y conservación del medio ambiente al reducirse las necesidades de extracción.

Por cada 1kg de calcín de botellas de vidrio se ahorra 1,2 kg de materiales vírgenes (arena, piedra caliza y carbonato de sodio).

Ahorro de recursos. Reciclando, se podría abastecer a la industria de la fabricación de vidrio con casi el 34% de los recursos que se necesitan.

Mejora de la calidad del agua. Al disminuir la contaminación entre un 40% y un 50%.

Se evita que los residuos vayan al vertedero. Por cada 3.000 botellas de vidrio recicladas se evita que 1.000 kg de basura acaben en el vertedero.

El vidrio que por distintas circunstancias no se utilice en la fabricación de nuevos envases puede ser reciclado en otros usos:

Como reemplazo de la arena, para actividades de abrasión en la pintura de automóviles.

Para la construcción de filtros lentos de agua, en reemplazo de la arena.

Como material para la protección de tuberías en zanjas.

Como reemplazo de agregados en la construcción de baldosas, bloques, adoquines.

(Recytrans, 2013)

2.3.2. Propiedades del vidrio molido

Las partículas de vidrio reciclado, machacado y molido son, en general, angulosas, con una proporción de lajas y agujas que depende, entre otros aspectos, del proceso de machaqueo. Las partículas más pequeñas, resultantes de procesos adicionales de molido, suelen tener menos angulosidad y menos proporción de agujas y lajas.

De forma general, el vidrio que se recupera tiene un peso específico de aproximadamente $2,5 \text{ gr/cm}^3$. Cabe destacar también que el vidrio machacado presenta unos valores altos de permeabilidad, similar a los de una arena gruesa, entre 10^{-1} y 10^{-2} cm/s , dependiendo de la granulometría.

Químicamente el vidrio de envases es inerte, pero inevitablemente hay una cierta contaminación. Ello es debido a que presenta una serie de impurezas, como por ejemplo restos textiles, corchos, bolsas de plástico, etiquetas u otros restos que se depositan en los contenedores conjuntamente con los envases.

2.3.3. Uso de vidrio molido en construcción de carreteras

2.3.3.1. Capas granulares

El vidrio reciclado convenientemente machacado y molido puede ser empleado como material granular en capas de base. El vidrio, una vez reducido a tamaños inferiores a 4,75mm presenta propiedades similares al árido fino convencional, con una estabilidad relativamente alta, debido a la angulosidad de las partículas de vidrio reciclado machacado. En general, este material debe ser mezclado con áridos gruesos convencionales para conseguir las granulometrías establecidas en las prescripciones para áridos para capas granulares.

Sin embargo, no hay aplicaciones documentadas del uso de este material como áridos para capas granulares.

Para su empleo como árido en capas granulares es preciso llevar a cabo el siguiente proceso:

Machaqueo y cribado, de forma que el material no tenga bordes cortantes ni con forma de aguja.

Limpieza, ya que el material debe quedar libre de metales y con un contenido prácticamente nulo de residuos orgánicos e inorgánicos.

2.3.3.2.Árido para mezclas bituminosas

El vidrio reciclado machacado y molido se puede emplear como una parte del árido fino en mezclas bituminosas. Se han obtenido buenos resultados incorporando entre un 10 y un 15% de vidrio molido en capas de rodadura, esta mezcla se suele denominar glassphalt. Mayores proporciones de vidrio reciclado en las mezclas, incorporando hasta un 25%, podrían ser empleadas en otras capas (intermedia o base). Las mezclas en caliente en capas de rodadura con porcentajes superiores al 25% pueden experimentar deterioros debido a pérdidas del ligante por la incorporación del vidrio reciclado.

Para su empleo como árido en mezclas bituminosas es preciso llevar a cabo el siguiente proceso:

Limpieza: el procesado del vidrio debe incluir la eliminación de todos los metales (férricos y no férricos). En general, en la mayor parte de las plantas esto se consigue por medio del cribado, separación por medio de corrientes magnéticas y eléctricas y/o separación manual.

Machaqueo y cribado: estos dos procesos son necesarios para conseguir las granulometrías adecuadas y eliminar lascas, agujas o partículas afiladas.

2.3.3.3.Otros usos

Otro posible uso, es como material de relleno o material de drenaje, aunque no citan experiencias de uso. En el marco del estudio llevado a cabo por los citados autores, se realizaron una serie de ensayos básicos para evaluar las características geotécnicas del árido procedente de vidrio reciclado. Se llegó a la conclusión de que el

comportamiento del material depende notablemente del tamaño y angulosidad de las partículas de vidrio. (CEDEX, 2017)

2.3.4. Investigaciones realizadas con la incorporación de vidrio molido

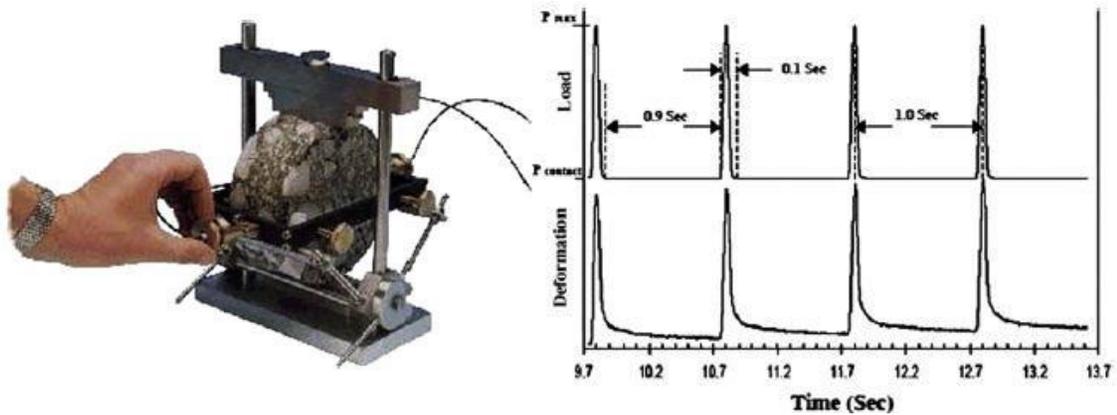
Muchos trabajos de investigación se han publicado en el tema de la adición de residuos de vidrio a mezclas de asfalto en pavimentación como una solución alternativa para reducir el volumen generado de residuos de vidrio y establecer una base para la comprensión y examinar el proceso de reciclaje de residuos de vidrio (Abrahams, 1972; Chesner, 1992; Flynn, 1993; Comisión de Carreteras del Estado iraquí y Puentes, 2003; Khedawi y Al-Qadi, 2008; Leite y Young, 1971; Martí y Mielke, 2002; Transporte Junta de Investigación de Nacional Academias, 2003; Molisch et al, 1975;. Molisch et al, 1972;. Nansu y Chen, 2002; Paker et al, 1998; Prithvi, 1998; Samtur, 1974; Shafabakhsh y Sajed, 2014; Shaopeng et al., 2003), de las cuales los aspectos más relevantes a tomar en cuenta se resumen a continuación:

El uso de vidrio pulverizado como aditivo en la construcción de carreteras debe cumplir una serie de criterios establecidos para garantizar la integridad estructural y la seguridad. La especificación más completa de cascajo de vidrio como un agregado de base de carretera, se publicó en 2001 por la Autoridad Federal de Carreteras (FHWA).

Se puede decir que el uso de vidrio se posibilita gracias a una granulometría muy exigente, las gradaciones impuestas para un mejor uso del vidrio como componente de la mezcla bituminosa.

Módulo de rigidez. El objetivo de este autor se centra en conocer si existe mejora en cuanto a módulo de rigidez gracias al vidrio reciclado dentro de la mezcla, además de saber si el comportamiento ante esfuerzos dinámico va en el mismo sentido. Para ello utiliza el ensayo ITSM de la AASHTO, que se constituye por cargas y descargas repetidas en un ciclo determinado; sólo comprimiendo la probeta unidireccionalmente, estando coaccionada en el resto de dimensiones.

Figura 7: Configuración del ensayo ITSM. Variación de carga y deformación para el ensayo dinámico ITSM



Fuente: Arabani M. (2010). Efecto de la concentración Vidrio - Glassphalt

El autor extrae unas afirmaciones que van en este sentido: la utilización de vidrio reciclado en mezcla bituminosa contribuya a mejorar el comportamiento del aglomerado ante esfuerzos dinámicos. Las variables a esta sentencia son la temperatura y el porcentaje de aditivos integrados en la mezcla. Otras conclusiones que salen de este estudio son las siguientes:

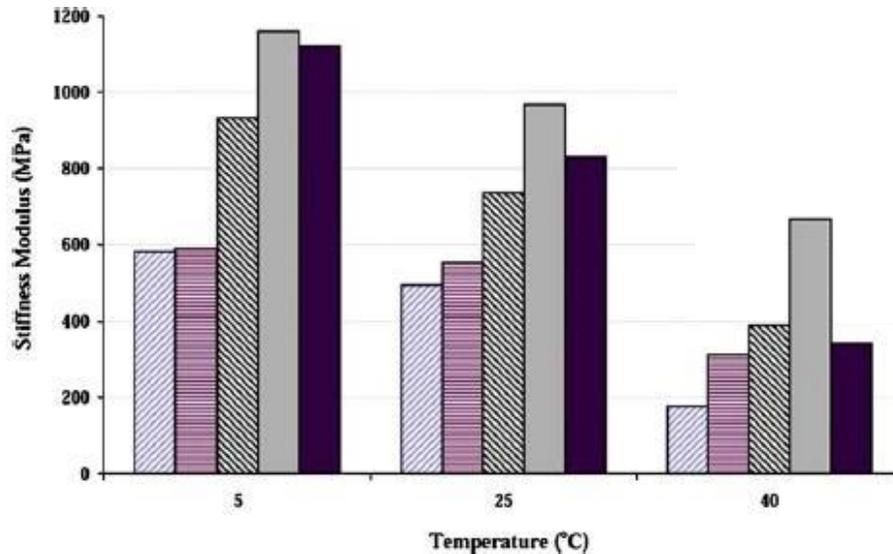
Las probetas con el añadido de vidrio y cal hidratada demuestran un incremento respecto al módulo de rigidez tomado como referencia. Las características propias de la cal aumentan la cohesión del material mineral con el vidrio y el propio betún.

Mayor rozamiento interno propiciado por la angulosidad de las partículas de vidrio triturado. Sin embargo, en las partículas de mayor tamaño su nivel de pulimento impide un mejor agarre con el betún y que redunda en el menor aumento del módulo de rigidez antes mencionado.

Menor sensibilidad a los cambios térmicos en el aglomerado con vidrio, tanto para la viscosidad como para el módulo de rigidez.

El gráfico siguiente dejará una visión más precisa de los resultados resumidos anteriormente:

Figura 8: Variación de módulo de rigidez de la mezcla bituminosa para diferentes contenidos de vidrio y temperaturas.



Fuente: Arabani M. (2010). Efecto de la concentración vidrio - glassphalt

2.3.5. Obras realizadas

Las experiencias realizadas con este residuo no son recientes, en New York y Norwalk (Connecticut, EE.UU) a principios de los años noventa ya se fabricaron mezclas que incorporaban un 20% de desperdicios de vidrio, en esta investigación se demostró la importancia de la utilización de un agente estabilizador como la cal para evitar los desprendimientos de áridos y vidrio de la mezcla. Fueron dichos problemas de desprendimientos de áridos los que llevaron a realizar un estudio que permitiera conocer las cantidades máximas de residuos a incorporar en la mezcla. Así, los tamaños de adición de este residuo en mezclas bituminosas han de ser de 4.75 mm como máximo (para evitar el pinchazo de los neumáticos). Por otra parte, la adición de este residuo disminuye el contenido de ligante de la mezcla, y por tanto abarata su coste.

Existen estudios que han demostrado que su aportación a las mezclas mejora la resistencia al deslizamiento, y a la hora de ejecutar las obras pueden emplearse la misma maquinaria que para las mezclas convencionales.

Además, en Estados Unidos se emplearon mezclas bituminosas con vidrio reciclado con resultados satisfactorios, al menos, en 45 emplazamientos diferentes en carreteras de bajo volumen. El departamento de transporte de Minnesota (Mn/DOT) elaboró un documento en el que explica las cuestiones básicas que se deben tener en cuenta de cara al empleo del vidrio reciclado como árido para la construcción de carreteras. En este documento (Reclaimed Glass Information Kit) se proporciona información para llevar a cabo un proyecto que tenga en cuenta el empleo de este material y se citan también experiencias de uso. (Belmonte Sanchez, 2009)

Imagen 10: Carretera con vidrio como parte de la mezcla bituminosa, reflejando la luz en uno de los tramos de prueba.



Fuente: Arabani M. (2010). Efecto de la concentración Vidrio - Glassphalt

Finalmente, cabe mencionar además, que en Puerto Rico, el presidente de la comisión de Desarrollo Integrado de la región Sur Central, ordenó al Departamento de Transportación y Obras Públicas (DTOP) y la autoridad de carreteras de Puerto Rico (AC), realizar un estudio sobre la viabilidad en la utilización de agregados reciclables en el asfalto de las vías públicas. De la misma forma ocurrió en los países de España y México desde hace pocos años. (Pagán Negró, 2017)

CAPÍTULO III
APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1. Elección del tipo de mezcla y forma de trabajo

La mezcla elegida para el desarrollo de la investigación es una mezcla asfáltica de granulometría densa, en caliente, en función al tamaño nominal que presentan los áridos usados en el diseño. Este tipo de mezcla se encuentra constituida aproximadamente por 90% de agregados pétreos (grava y arena comprendidas entre 40% a 60%), 5% de polvo mineral filler, y otro 5% de ligante asfáltico, de manera que el porcentaje de vacíos de la mezcla no supere el 6%.

Con la idea de realizar un análisis detallado del comportamiento del residuo en la mezcla asfáltica, así como establecer los porcentajes máximos de reutilización, se diseñaron cuatro fórmulas de trabajo cuyas variables son los porcentajes de residuo adicionadas en la fracción fina (5%, 10%, 15%, y 20% de vidrio molido).

Además, con objeto de poder comparar los resultados obtenidos con una mezcla de referencia, de estas cuatro fórmulas, se estudia una quinta cuya composición contiene únicamente materiales convencionales en todas las fracciones (grava, arena y filler-cemento).

3.2. Materiales empleados en el estudio

Los materiales a utilizar deben cumplir ciertas especificaciones de la Norma ASTM, AASHTO y ABC. Para la presente investigación utilizaremos materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustan dentro las normativas vigentes, tomando en cuenta su disponibilidad.

Los materiales pétreos, al igual que el cemento asfáltico, fueron recolectados en instalaciones de la Secretaría de Obras y Servicios Públicos de la Alcaldía Municipal de Tarija, ubicado en la avenida Panamericana y calle Guadalquivir, el cual cuenta con acopios de áridos que son empleados en la construcción de obras desarrolladas en la ciudad.

Imagen 11: Ubicación, Secretaría de Obras y Servicios Públicos – Alcaldía Municipal de Tarija



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los desechos de vidrio, usado en la investigación, fueron recolectados de manera independiente por alrededores de la ciudad de Tarija, desechos que se encontraban en la intemperie y tenían como destino el botadero municipal. Los desechos de vidrio se recolectaron principalmente en parques, calles y canchas de la ciudad.

Imagen 12: Recolección de desechos de vidrio en la ciudad de Tarija



Fuente: Elaboración propia

3.3. Tratamiento previo del vidrio

Posterior a la recolección del vidrio, los residuos debieron someterse a un tratamiento previo. Éste consistió primeramente en la limpieza del material recolectado, de manera que las impurezas presentes en los materiales de vidrio sean desalojadas con cuidado.

Imagen 13: Limpieza de residuos de vidrio recolectados



Fuente: Elaboración propia

Seguidamente se realizó la reducción del residuo en fracciones aproximadamente menores a 5 mm.

Puesto que el departamento de Tarija no cuenta con una planta trituradora de vidrio, se ejecutó la trituración y molido correspondiente de forma manual con todos los instrumentos adecuados, primeramente introduciendo todas las piezas de vidrio a una bolsa de tela resistente y sin aberturas, luego, con ayuda de un martillo y con mucho cuidado, se trituró el vidrio contenido en la bolsa, generando golpes moderados por la parte exterior, de forma que queden pedazos pequeños que facilite el molido correspondiente. El molido del vidrio, igualmente se lo realizó dentro la bolsa de tela, pero esta vez generando golpes más dinámicos para procurar que se formen partículas de vidrio lo suficientemente pequeñas.

Imagen 14: Instrumentos necesarios para el tratamiento previo del residuo sólido



Fuente: Elaboración propia

Imagen 15: Triturado y molido del vidrio



Fuente: Elaboración propia

Imagen 16: Depósito del material molido



Fuente: Elaboración propia

Finalizado el proceso de triturado y molido del vidrio, se recolectó con mucho cuidado los pedazos contenidos dentro la bolsa en un recipiente, para que con ayuda de un tamiz se aparte aquellas partículas que se encuentren fuera del tamaño máximo establecido. Aquellas partículas de vidrio que quedaron fuera de la selección, fueron sometidas a un nuevo molido como anteriormente se describió.

Las partículas menores a 4.75 mm (tamiz N° 4) constituirán el material de estudio dentro de las mezclas asfálticas, y estarán listas para su incorporación a los agregados.

Imagen 17: Selección de las partículas de vidrio para la investigación



Fuente: Elaboración propia

3.4. Caracterización de los materiales usados en el estudio

3.4.1. Caracterización de agregados y filler

Tras la obtención de las fracciones definitivas a utilizar durante el desarrollo de la investigación, se procede a la caracterización de cada uno de los materiales usados para el diseño de mezclas asfálticas. El plan de ensayos general a ejecutar para llevar a cabo dicho proceso se define en base a las prescripciones establecidas por el “Manual de ensayos y materiales asfálticos” elaborado por la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.), para áridos utilizados en la fabricación de mezclas bituminosas.

La caracterización de los agregados correspondientes, además del filler, se los realizó en el Laboratorio de Hormigones y Resistencia de materiales, y el Laboratorio de Suelos, de la Universidad Juan Misael Saracho de la ciudad de Tarija. Los ensayos realizados se describen a continuación:

Tabla 13: Caracterización de los agregados

Agregado grueso (Grava y gravilla)	Método para determinar la granulometría (ASTM E 40 – AASHTO T27-99). A0506
	Método para determinar el desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99). A0511
	Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM E 127 AASHTO T85-91). A0519
	Método para determinar caras fracturadas. A0508
	Método de los sulfatos para determinar la desintegración (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516
	Método para determinar la adherencia agregado – ligante asfáltico (ASTM D 1664). A0701

Agregado fino (Arena y vidrio)	Método para determinar la granulometría (ASTM E 40 – AASHTO T27-99). A0506
	Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D 2419 AASHTO T176-00). A0509
	Método de los sulfatos para determinar la desintegración (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516
	Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128 AASHTO T84-00). A0520.
	Método para determinar la adherencia agregado – ligante asfáltico (Riedel – Weber). A0118
Filler (Cemento)	Método para determinar la granulometría del filler. A0502

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.1. Granulometría (ASTM E 40 – AASHTO T27-99). A0506.

Una muestra de agregado seco de masa conocida es separada a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente menores, para la determinación de la distribución de tamaño de las partículas. Los resultados se usan para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de las partículas, según los requisitos especificados y para proporcionar información necesaria en el control de la producción de agregados y mezclas que contienen agregados. La información también puede ser usada en el desarrollo de relaciones concernientes posteriores ensayos.

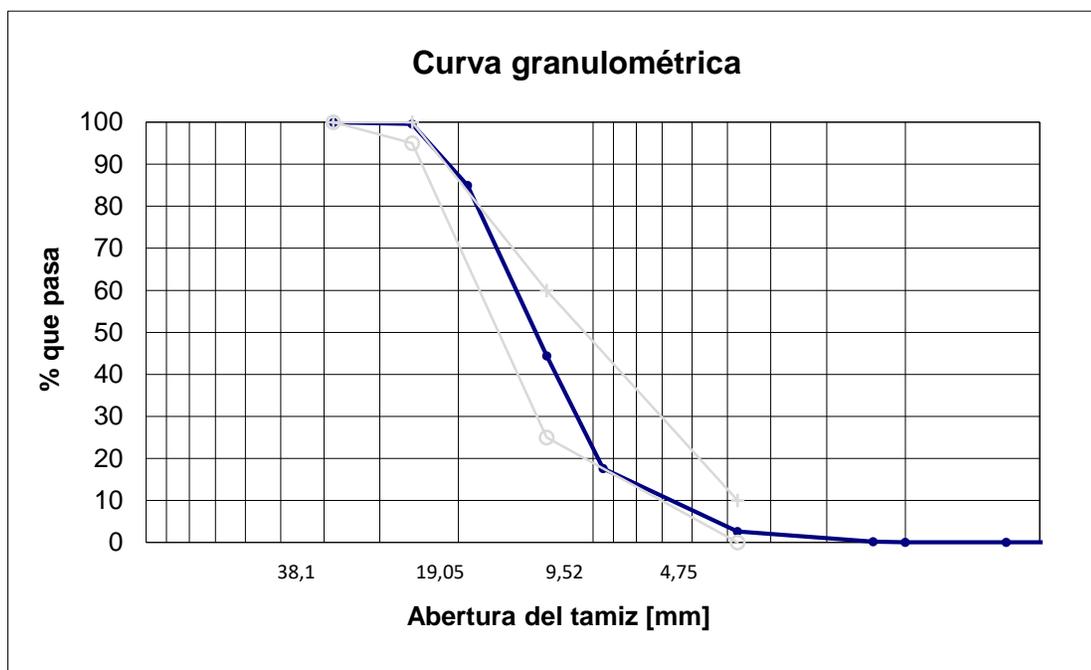
Granulometría del agregado grueso

Tabla 14: Granulometría – agregado grueso

Peso total (gr)		5000			
Tamices	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	Peso retenido acumulado		% que pasa del total
			(gr)	(%)	
2"	50,8	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,4	20,37	20,37	0,41	99,59
3/4"	19,1	731,00	751,37	15,03	84,97
1/2"	12,7	2029,07	2780,43	55,61	44,39
3/8"	9,5	1340,07	4120,50	82,41	17,59
N°4	4,8	748,03	4868,53	97,37	2,63
N°8	2,4	123,97	4992,50	99,85	0,15
N°10	2,0	5,53	4998,03	99,96	0,04
Base		0,50	4998,53	99,97	0,03
	Sumas	4998,53			
	Pérdidas	1,47			

Fuente: Elaboración propia

Figura 9: Curva granulométrica – agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

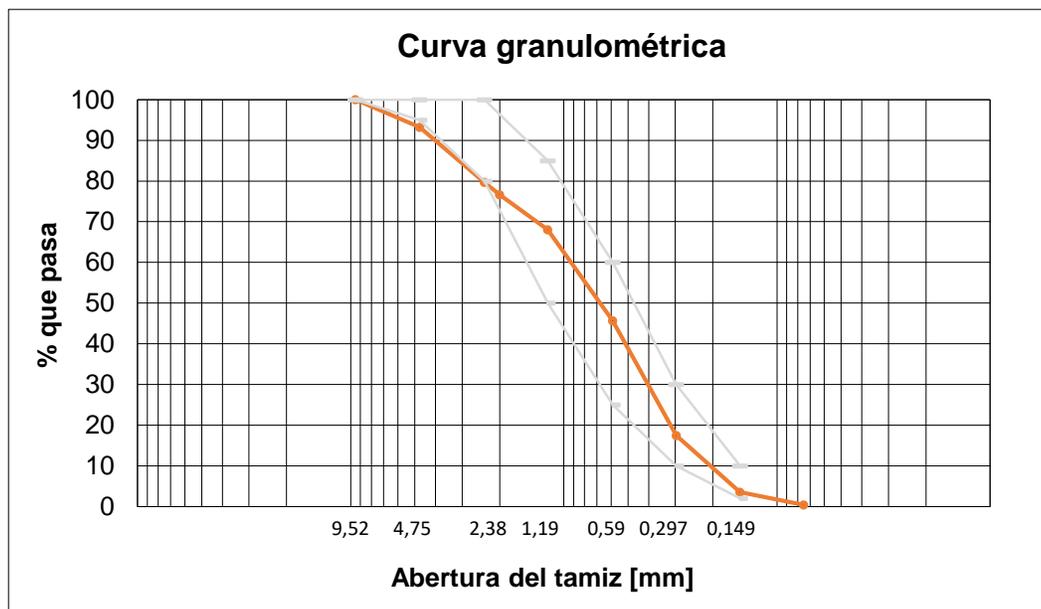
Granulometría del agregado fino

Tabla 15: Granulometría – agregado fino (arena)

Tamices	Peso total (gr)		500		% que pasa del total
	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	(%)	
3/8"	9,52	0,00	0,00	0,00	100,00
N° 4	4,75	34,10	34,10	6,82	93,18
N° 8	2,38	67,50	101,60	20,32	79,68
N° 10	2,00	15,13	116,73	23,35	76,65
N° 16	1,19	43,03	159,77	31,95	68,05
N° 30	0,59	111,80	271,57	54,31	45,69
N° 50	0,297	141,10	412,67	82,53	17,47
N° 100	0,149	69,57	482,23	96,45	3,55
N° 200	0,074	15,80	498,03	99,61	0,39
Base		1,00	499,03	99,81	0,19
	Sumas	499,03			
	Pérdidas	0,97			

Fuente: Elaboración propia

Figura 10: Curva granulométrica – agregado fino (arena)



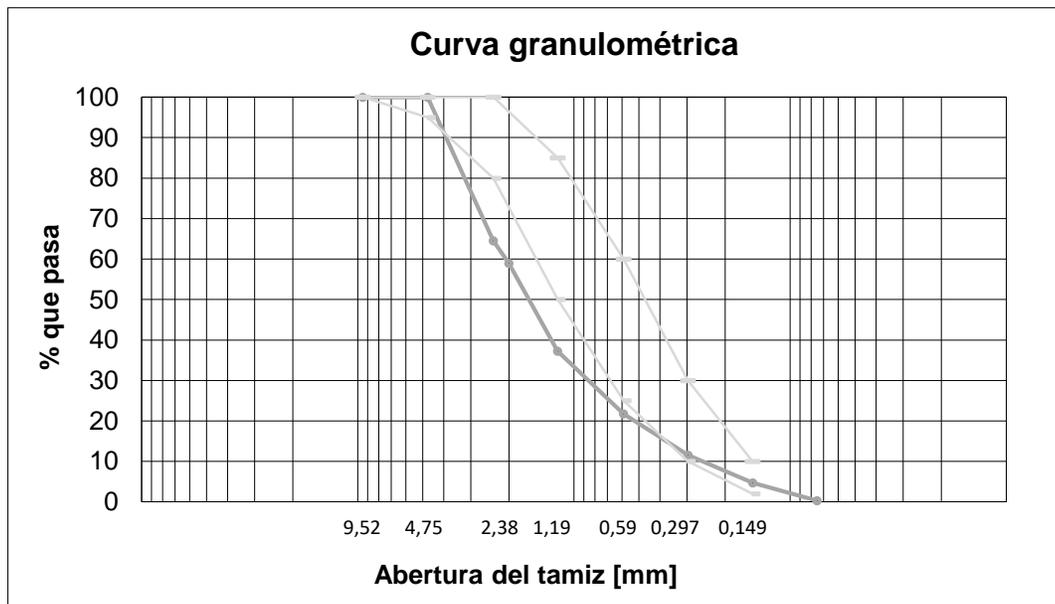
Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: Granulometría – agregado fino (vidrio)

Tamices	Peso total (gr)		620		% que pasa del total
	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	(%)	
3/8"	9,52	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 8	2,38	219,80	219,80	35,45	64,55
Nº 10	2,00	34,60	254,40	41,03	58,97
Nº 16	1,19	134,50	388,90	62,73	37,27
Nº 30	0,59	96,00	484,90	78,21	21,79
Nº 50	0,297	63,30	548,20	88,42	11,58
Nº 100	0,149	42,70	590,90	95,31	4,69
Nº 200	0,074	27,10	618,00	99,68	0,32
Base		1,00	619,00	99,84	0,16
	Sumas	619,00			
	Pérdidas	1,00			

Fuente: Elaboración propia

Figura 11: Curva granulométrica – agregado fino (vidrio)



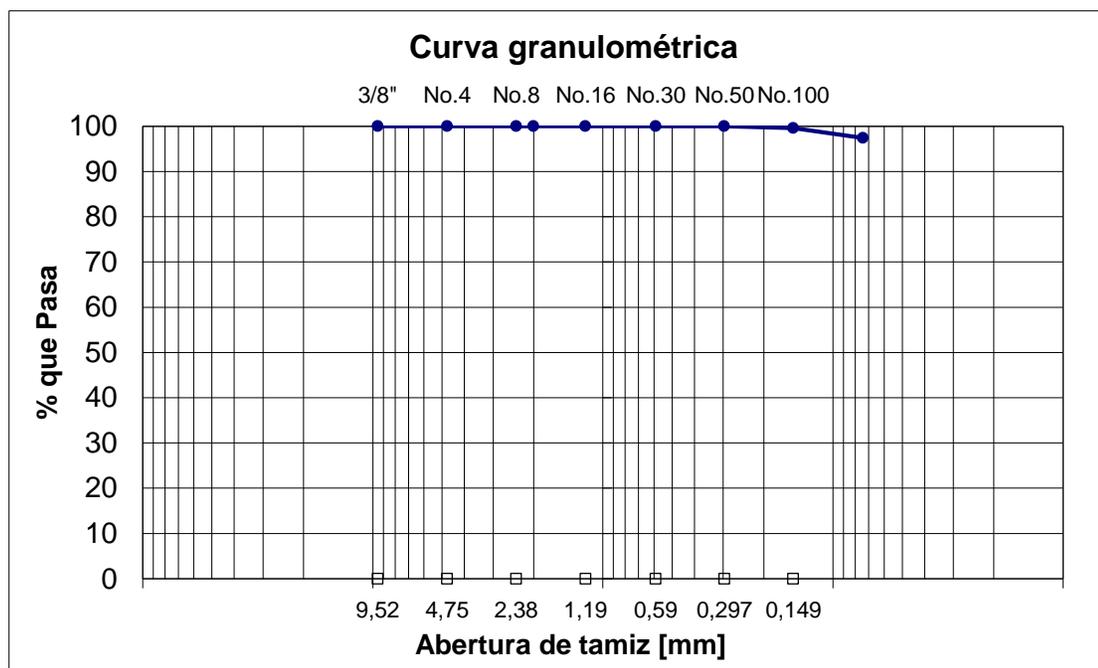
Fuente: Elaboración propia

Tabla 17: Granulometría – filler cemento

Tamices	Peso total (gr)		50		% que pasa del total
	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	(%)	
3/8"	9,52	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 8	2,38	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 10	2,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 16	1,19	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 30	0,59	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 50	0,297	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 100	0,149	0,20	0,20	0,40	99,60
Nº 200	0,074	1,10	1,30	2,60	97,40
Base		48,60	49,90	99,80	0,20
	Sumas	49,90			
	Pérdidas	0,10			

Fuente: Elaboración propia

Figura 12: Granulometría – filler cemento



Fuente: Elaboración propia

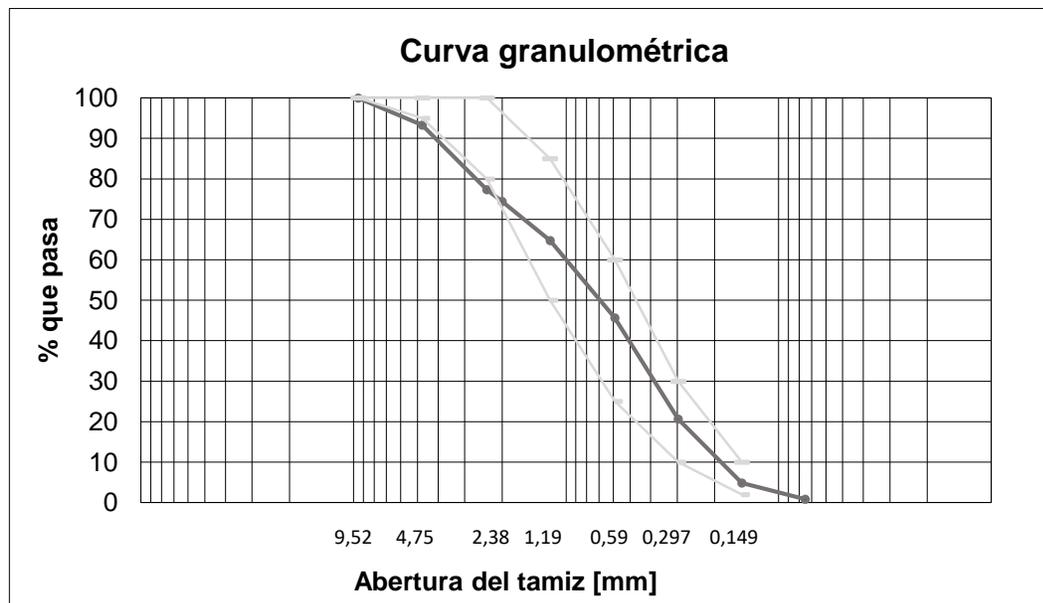
Ensayos adicionales de caracterización.

Tabla 18: Granulometría de arena + 5% vidrio

Tamices	Peso total (gr)		550		% que pasa del total
	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	(%)	
3/8"	9,52	0,00	0,00	0,00	100,00
N° 4	4,75	36,90	36,90	6,71	93,29
N° 8	2,38	87,90	124,80	22,69	77,31
N° 10	2,00	15,70	140,50	25,55	74,45
N° 16	1,19	53,20	193,70	35,22	64,78
N° 30	0,59	105,30	299,00	54,36	45,64
N° 50	0,297	137,30	436,30	79,33	20,67
N° 100	0,149	86,80	523,10	95,11	4,89
N° 200	0,074	22,40	545,50	99,18	0,82
Base		2,90	548,40	99,71	0,29
	Sumas	548,40			
	Pérdidas	1,60			

Fuente: Elaboración propia

Figura 13: Curva granulométrica de arena + 5% vidrio



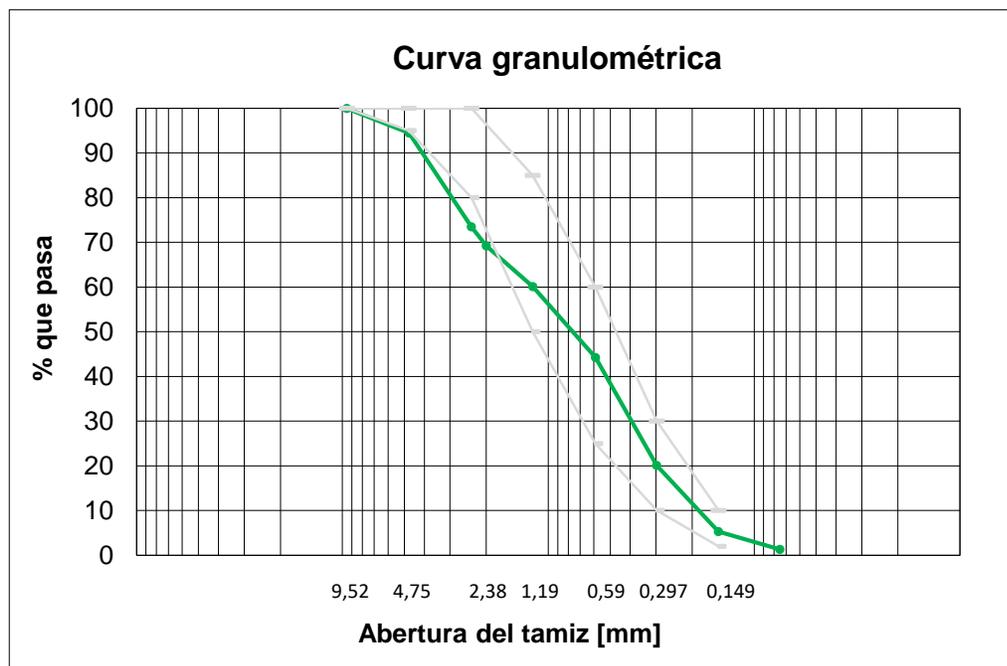
Fuente: Elaboración propia

Tabla 19: Granulometría de arena + 10 % vidrio

Tamices	Peso Total (gr)		550		% que pasa del total
	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	(%)	
3/8"	9,52	0,00	0,00	0,00	100,00
N° 4	4,75	30,30	30,30	5,51	94,49
N° 8	2,38	115,60	145,90	26,53	73,47
N° 10	2,00	23,40	169,30	30,78	69,22
N° 16	1,19	50,10	219,40	39,89	60,11
N° 30	0,59	87,30	306,70	55,76	44,24
N° 50	0,297	132,80	439,50	79,91	20,09
N° 100	0,149	81,50	521,00	94,73	5,27
N° 200	0,074	21,80	542,80	98,69	1,31
Base		5,90	548,70	99,76	0,24
	Sumas	548,70			
	Pérdidas	1,30			

Fuente: Elaboración propia

Figura 14: Curva granulométrica de arena + 10 % vidrio



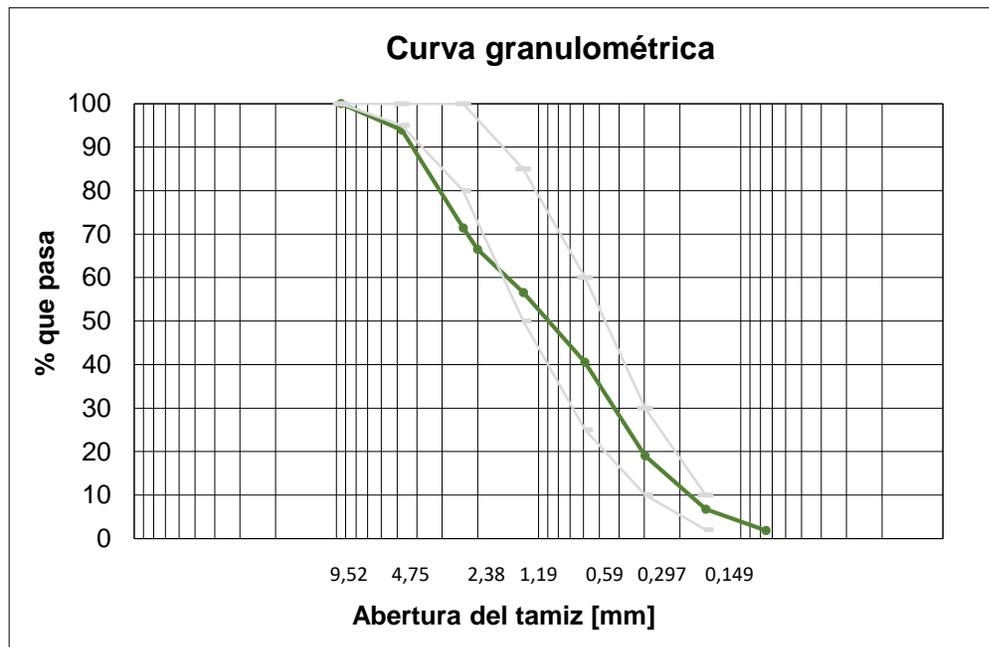
Fuente: Elaboración propia

Tabla 20: Granulometría de arena + 15 % vidrio

Tamices	Peso total (gr)		550		% que pasa del total
	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	(%)	
3/8"	9,52	0,00	0,00	0,00	100,00
N° 4	4,75	33,30	33,30	6,05	93,95
N° 8	2,38	123,80	157,10	28,56	71,44
N° 10	2,00	27,20	184,30	33,51	66,49
N° 16	1,19	54,70	239,00	43,45	56,55
N° 30	0,59	88,20	327,20	59,49	40,51
N° 50	0,297	118,30	445,50	81,00	19,00
N° 100	0,149	67,30	512,80	93,24	6,76
N° 200	0,074	27,10	539,90	98,16	1,84
Base		9,40	549,30	99,87	0,13
	Sumas	549,30			
	Pérdidas	0,70			

Fuente: Elaboración propia

Figura 15: Curva granulométrica de arena + 15 % vidrio



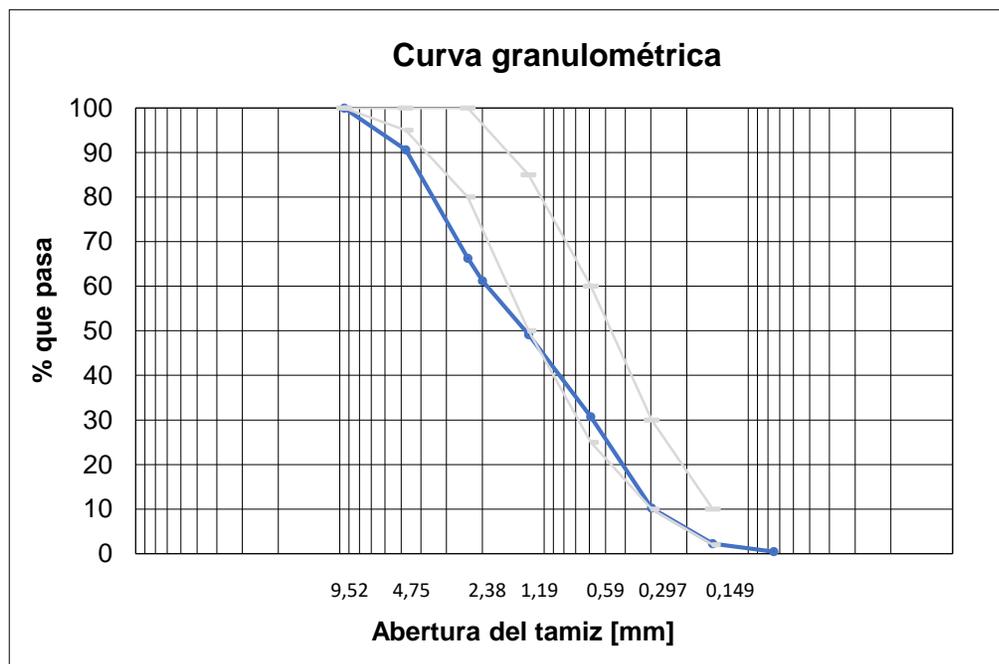
Fuente: Elaboración propia

Tabla 21: Granulometría de arena + 20 % vidrio

Tamices	Peso total (gr)		550		% que pasa del Total
	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	Peso Retenido Acumulado (gr)	(%)	
3/8"	9,52	0,00	0,00	0,00	100,00
N° 4	4,75	51,70	51,70	9,40	90,60
N° 8	2,38	134,00	185,70	33,76	66,24
N° 10	2,00	27,70	213,40	38,80	61,20
N° 16	1,19	66,20	279,60	50,84	49,16
N° 30	0,59	101,30	380,90	69,25	30,75
N° 50	0,297	112,90	493,80	89,78	10,22
N° 100	0,149	44,10	537,90	97,80	2,20
N° 200	0,074	9,70	547,60	99,56	0,44
Base		1,20	548,80	99,78	0,22
	Sumas	548,80			
	Pérdidas	1,20			

Fuente: Elaboración propia

Figura 16: Curva granulométrica de arena + 20 % vidrio



Fuente: Elaboración propia

3.4.1.2. Peso específico y absorción de los agregados

Peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM E 127 AASHTO T85-91). A0519

Los agregados muestreados sumergirlos en agua por aproximadamente 24 horas hasta llenar esencialmente los poros. Entonces removerlos del agua, secar el agua superficial de las partículas, y pesar. Seguidamente tomar la muestra y pesarla mientras se sumerge en agua. Finalmente las muestras son secadas en el horno y pesadas por tercera vez. Usando la masa y peso de las mediciones obtenidas, y las fórmulas del método, es posible calcular los tres tipos de gravedad específica y la absorción.

Tabla 22: Peso específico del agregado grueso

Material	Característica	Peso específico (gr/cm ³)
Grava	Peso específico seco (PBS)	2,605
	Peso específico aparente (PEA)	2,667
	Peso específico bruto saturado superficialmente seco (PEBSSS)	2,629
	% de absorción	0,886 %

Fuente: Elaboración propia

Peso específico y absorción del agregado fino (ASTM E 128 AASHTO T84-00). A0520.

Se toma una muestra representativa de agregado fino la cual se sumerge durante 24 horas. Al día siguiente se expande la muestra sobre la superficie de un recipiente o bandeja la cual no es absorbente. Con el secador se le inyecta una corriente de aire hasta conseguir un secado uniforme, la operación es terminada cuando los granos del agregado están sueltos. Luego se introduce la muestra en un molde cónico, se apisona unas 25 veces dejando caer el pisón desde una altura aproximada de 1 cm, posteriormente se nivela y si al quitar el molde la muestra se deja caer es porque no existe humedad libre, si es lo contrario se sigue secando y se repite el proceso hasta

que cumpla con la condición. Cuando se cae el agregado al quitar el molde cónico es porque se ha alcanzado una condición saturada con superficie seca.

Se procede a tomar una muestra de 500 gramos del agregado para envasarla en el picnómetro llenándolo con agua a 20°C hasta más o menos 250 cm³, luego se hace girar el picnómetro para eliminar todas las burbujas de aire posibles. Se procede a cuantificar el peso del picnómetro en la balanza anotando su respectivo valor.

Al término de este paso, se embaza la muestra en tazas para ser dejadas en el horno por espacio de 24 horas. Y por último, al día siguiente se llevaron las muestras a la balanza y se cuantifico su valor. Se tomaron apuntes.

Tabla 23: Peso específico del agregado fino (arena)

Material	Característica	Peso específico (gr/cm ³)
Arena	Peso específico seco (PBS)	2,456
	Peso específico aparente (PEA)	2,544
	Peso específico bruto saturado superficialmente seco (PEBSSS)	2,491
	% de absorción	1,404 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24: Peso específico del agregado fino (vidrio)

Material	Característica	Peso específico (gr/cm ³)
Vidrio molido	Peso específico seco (PBS)	2,316
	Peso específico aparente (PEA)	2,325
	Peso específico bruto saturado superficialmente seco (PEBSSS)	2,320
	% de absorción	0,168 %

Fuente: Elaboración propia

Ensayos adicionales de caracterización.

Tabla 25: Peso específico de la arena + 5% vidrio

Material	Característica	Peso específico (gr/cm ³)
Arena + 5% vidrio	Peso específico seco (PBS)	2,456
	Peso específico aparente (PEA)	2,539
	Peso específico bruto saturado superficialmente seco (PEBSSS)	2,489
	% de absorción	1,332 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26: Peso específico de la arena + 10% vidrio

Material	Característica	Peso específico (gr/cm ³)
Arena + 10% vidrio	Peso específico seco (PBS)	2,449
	Peso específico aparente (PEA)	2,528
	Peso específico bruto saturado superficialmente seco (PEBSSS)	2,480
	% de absorción	1,283 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27: Peso específico de la arena + 15% vidrio

Material	Característica	Peso específico (gr/cm ³)
Arena + 15% vidrio	Peso específico seco (PBS)	2,421
	Peso específico aparente (PEA)	2,492
	Peso específico bruto saturado superficialmente seco (PEBSSS)	2,449
	% de absorción	1,175 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28: Peso específico de la arena + 20% vidrio

Material	Característica	Peso específico (gr/cm ³)
Arena + 20% vidrio	Peso específico seco (PBS)	2,359
	Peso específico aparente (PEA)	2,421
	Peso específico bruto saturado superficialmente seco (PEBSSS)	2,385
	% de absorción	1,080 %

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.3. Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99). A0511

Este ensayo es una medida al desgaste de los agregados minerales de graduaciones estándar resultado de una combinación de acciones que incluye la abrasión o el desgaste, impacto, y desintegración en un tambor de acero rotatorio que contiene un número especificado de esferas de acero, el número de esferas depende de la graduación de la muestra de ensayo.

A medida que el tambor gira, una lámina del estante recoge la muestra y las esferas de acero, llevándolos de un lado hacia el otro hasta dejarlos caer en el lado opuesto del tambor, creando un efecto de aplastamiento e impacto.

Los contenidos entonces ruedan dentro del tambor con una acción de desgaste y pulverización, hasta que la lámina del estante recoge la muestra y las esferas de acero, en ciclos repetitivos.

Después del número prescrito de revoluciones, los contenidos son removidos del tambor y la porción del agregado es tamizada para medir el desgaste como un porcentaje de pérdida.

Tabla 29: Desgaste de Los Ángeles – agregado grueso

Ensayo desgaste de Los Ángeles						
Retenido Tamiz 1/2" (gr)	Retenido Tamiz 3/8" (gr)	Total (gr)	Retenido Tamiz N° 10	Diferencia (gr)	Desgaste %	Especificación máxima (%)
2500	2500	5000	3618,7	1381,3	27,626	40

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.4. Caras fracturadas de agregado grueso

Esta norma describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en masa o por conteo de una muestra de agregado grueso compuesta por partículas fracturadas que cumplen con los requisitos específicos.

Se lava el material sobre el tamiz designado para la determinación de las partículas fracturadas, con el fin de remover cualquier residuo de material fino y se seca a masa constante. Se debe determinar la masa de la muestra y cualquier determinación de masa posterior con una aproximación del 0.1% de la masa seca original de la muestra. Se debe esparcir la muestra seca en una superficie suficientemente grande, para inspeccionar cada partícula. Para verificar que una partícula cumple el criterio de fractura, se sostiene la partícula de agregado de tal manera que la cara pueda ser observada directamente. Si la cara constituye al menos un cuarto de la mayor sección transversal de la partícula, se debe considerar como una cara fracturada.

Tabla 30: Caras fracturadas – agregado grueso

Ensayo de caras fracturadas				
Peso de la muestra (gr)	Peso de caras fracturadas (gr)	Peso de caras sanas (gr)	Porcentaje de caras fracturadas (%)	Especificaciones mínimo (%)
1000	959,1	40,9	95,9	75

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.5. Durabilidad de agregados mediante el método de sulfatos (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516

Este método cubre los procedimientos a ser seguidos en ensayos de agregados para determinar su resistencia a la desintegración por soluciones saturadas de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. Esto es hecho por la inmersión repetida en soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio, seguido por secado en horno para una deshidratación parcial o completa de la sal precipitada, en espacios permeables de los poros. La fuerza interna expansiva, derivada de la rehidratación de la sal en la reinmersión, simula la expansión de agua en el congelamiento.

Este método de ensayo provee información útil para juzgar la calidad de agregados sujetos a la acción del clima, particularmente cuando la información adecuada no está disponible en un servicio de registros del material expuesto para las condiciones reales de desgaste. Se llama la atención al hecho que los resultados de ensayos por el uso de las dos sales difieren considerablemente y se debe tener cuidado en fijar límites correctos en cualquier especificación que incluya requisitos para estos ensayos.

Durabilidad del agregado grueso

Tabla 31: Durabilidad mediante método de sulfatos – grava

Granulometría				Peso materiales		Pérdida por diferencia (gr)	% Pasa Tamiz más fino	% Pérdida respecto Tamiz	% Pérdidas respecto al total
Tamiz N°	Tamiz Pasa	Tamiz Ret.	Material	Antes (gr)	Después (gr)				
2"	2"	1"	100	0,0	0,0				
1 "	1 "	3/4"	91,21	500,0	485,1	14,9	52,87	2,98	1,58
3/4"	3/4"	1/2"	38,34	670,0	650,5	19,5	23,39	2,91	0,68
1/2"	1/2"	3/8"	14,95	330,0	311,1	18,9	14,55	5,73	0,83
3/8"	3/8"	N° 4							
Total % pérdida de peso									3,09
Máximo									12,00

Fuente: Elaboración propia

Durabilidad del agregado fino

Tabla 32: Durabilidad mediante método de sulfatos – arena

Granulometría				Peso materiales		Pérdida por diferencia (gr)	% Pasa Tamiz más fino	% Pérdida respecto Tamiz	% Pérdidas respecto al total
Tamiz N°	Tamiz Pasa	Tamiz Ret.	Material	Antes (gr)	Después (gr)				
3/8"	3/8"	N° 4	93,8	100,0	89,2	10,8	14,12	10,80	1,52
N° 4	N° 4	N° 8	79,68	100,0	98,5	1,5	11,64	1,50	0,17
N° 8	N° 8	N° 16	68,04	100,0	93,7	6,3	22,36	6,34	1,42
N° 16	N° 16	N° 30	45,68	100,0	96,1	3,9	28,22	3,88	1,09
N° 30	N° 30	N° 50	17,46	100,0	90,3	9,7	17,46	9,70	1,69
Total % pérdida de peso									5,91
Máximo									12,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33: Durabilidad mediante método de sulfatos - vidrio

Granulometría				Peso materiales		Pérdida por diferencia (gr)	% Pasa Tamiz más fino	% Pérdida respecto Tamiz	% Pérdidas respecto al total
Tamiz N°	Tamiz Pasa	Tamiz Ret.	Material	Antes (gr)	Después (gr)				
3/8"	3/8"	N° 4	100	0	0				
N° 4	N° 4	N° 8	79,68	100,0	100,0	0,0	11,64	0,00	0,00
N° 8	N° 8	N° 16	68,04	100,0	98,9	1,1	22,36	1,10	0,25
N° 16	N° 16	N° 30	45,68	100,0	98,5	1,5	28,22	1,50	0,42
N° 30	N° 30	N° 50	17,46	100,0	99,2	0,8	17,46	0,80	0,14
Total % pérdida de peso									0,81
Máximo									12,00

Fuente: Elaboración propia

Ensayos adicionales de caracterización.

Tabla 34: Durabilidad mediante método de sulfatos – arena + 10% vidrio

Granulometría				Peso materiales		Pérdida por diferencia (gr)	% Pasa Tamiz más fino	% Pérdida respecto Tamiz	% Pérdidas respecto al total
Tamiz N°	Tamiz Pasa	Tamiz Ret.	Material	Antes (gr)	Después (gr)				
3/8"	3/8"	N° 4	100	100,0	89,5	10,5	20,32	10,50	2,13
N° 4	N° 4	N° 8	79,68	100,0	99,4	0,6	11,64	0,60	0,07
N° 8	N° 8	N° 16	68,04	100,0	94,9	5,1	22,36	5,10	1,14
N° 16	N° 16	N° 30	45,68	100,0	97,6	2,4	28,22	2,40	0,68
N° 30	N° 30	N° 50	17,46	100,0	91,8	8,2	17,46	8,20	1,43
Total % pérdida de peso									5,45
Máximo									12,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35: Durabilidad mediante método de sulfatos – arena + 15% vidrio

Granulometría				Peso materiales		Pérdida por diferencia (gr)	% Pasa Tamiz más fino	% Pérdida respecto Tamiz	% Pérdidas respecto al total
Tamiz N°	Tamiz Pasa	Tamiz Ret.	Material	Antes (gr)	Después (gr)				
3/8"	3/8"	N° 4	100	100,0	89,2	10,8	20,32	10,80	2,19
N° 4	N° 4	N° 8	79,68	100,0	99,1	0,9	11,64	0,90	0,10
N° 8	N° 8	N° 16	68,04	100,0	95,9	4,1	22,36	4,10	0,92
N° 16	N° 16	N° 30	45,68	100,0	97,9	2,1	28,22	2,10	0,59
N° 30	N° 30	N° 50	17,46	100,0	93,3	6,7	17,46	6,70	1,17
Total % pérdida de peso									4,98
Máximo									12,00

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.6. Equivalente de arena

La intención de éste ensayo es que sirva como una prueba de campo rápida para mostrar las proporciones relativas de polvo fino o material arcilloso en suelos o agregados graduados. A un volumen determinado de suelo o agregado fino se le adiciona una pequeña cantidad de solución floculante, mezclándolos en un cilindro de plástico graduado y agitándolos para que las partículas de arena pierdan la cobertura arcillosa. La muestra es entonces irrigada, usando una cantidad adicional de solución floculante, para forzar el material arcilloso a quedar en suspensión encima de la arena.

Después de un período de sedimentación, se determinan las alturas de la arcilla floculada y de la arena en el cilindro. El equivalente de arena es la relación entre la altura de arena y la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

Tabla 36: Equivalente de arena – arena

Ensayo N°	Lecturas			Promedio	
	1	2	3		
Lectura nivel superior	11,8	11,1	12		
Lectura nivel inferior	10,7	10,3	11		
% de arena	90,7	92,8	91,7	91,7	> 45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37: Equivalente de arena – vidrio

Ensayo N°	Lecturas			Promedio	
	1	2	3		
Lectura nivel superior	11,8	11,7	11,4		
Lectura nivel inferior	10,1	10,2	10		
% de arena	85,6	87,2	87,7	86,8	> 45

Fuente: Elaboración propia

Ensayos adicionales de caracterización.

Tabla 38: Equivalente de arena – arena + 5% vidrio

Ensayo N°	Lecturas			Promedio	
	1	2	3		
Lectura nivel superior	11,8	11,2	11,9		
Lectura nivel inferior	10,6	10,4	10,9		
% de arena	89,8	92,9	91,6	91,4	> 45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39: Equivalente de arena – arena + 10% vidrio

Ensayo N°	Lecturas			Promedio	
	1	2	3		
Lectura nivel superior	12,4	12,3	12,4		
Lectura nivel inferior	11,4	11,1	11		
% de arena	91,9	90,2	88,7	90,3	> 45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40: Equivalente de arena – arena + 15% vidrio

Ensayo N°	Lecturas			Promedio	
	1	2	3		
Lectura nivel superior	12,8	12,9	12,7		
Lectura nivel inferior	11,4	11,3	11,3		
% de arena	89,1	87,6	89,0	88,5	> 45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41: Equivalente de arena – arena + 20% vidrio

Ensayo N°	Lecturas			Promedio	
	1	2	3		
Lectura nivel superior	10,3	10,0	10,1		
Lectura nivel inferior	9,3	9,0	8,5		
% de arena	90,3	90,0	84,2	88,1	> 45

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.7. Adherencia agregado – ligante asfáltico (ASTM D 1664). A0701

Agregado grueso

Establece el procedimiento para la determinación del porcentaje de adherencia entre un ligante bituminoso y una muestra representativa del agregado grueso que se va a utilizar en un pavimento asfáltico.

Tabla 42: Adherencia agregado – ligante asfáltico

Registro fotográfico:			
			
Posterior al periodo de inmersión en agua, se determinó visualmente la adherencia de la película de ligante asfáltico o cubrimiento, sin agitación y con la mezcla inmóvil.			
Área del árido cubierto con ligante asfáltico	99%	Mínimo especificado	> 95%

3.4.1.8. Adherencia agregado – ligante asfáltico (Riedel – Weber). A0118

Agregado fino

El ensayo de Riedel Weber tiene por finalidad determinar el grado de adhesividad del agregado fino con el asfalto. La arena que forma parte de una mezcla asfáltica debe tener propiedades químicas adecuadas que permitan la elaboración de una mezcla uniforme, que cumpla con todos los requisitos de durabilidad. Una de ellas es medir la adhesividad de los ligantes bituminosos respecto de una arena natural o machaqueo, cuando la mezcla árido-ligante se somete a la acción de soluciones de carbonato de sodio a concentraciones crecientes.

Tabla 43: Grado de Concentraciones de disoluciones molares

Concentraciones de disoluciones molares	CO ₃ Na ₂ (gr/lit)	Grado
H ₂ O destilada		0
m/256	0.414	1
m/128	0.828	2
m/64	1.656	3
m/32	3.313	4
m/16	6.625	5
m/8	13.25	6
m/4	26.5	7
m/2	53	8
m/1	106	9

Fuente: Manual de ensayos y materiales asfálticos, Recuperado de Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.)

Tabla 44: Adherencia agregado – ligante asfáltico mediante el ensayo Riedel-Weber (arena y vidrio)

Material	Observación
Arena	Según la observación visual realizada en el ensayo de Riedel Weber, se puede afirmar que se notó desprendimiento entre el agregado fino (arena) y el asfalto en el tubo de prueba con la concentración de grado 8.
Vidrio	Según la observación visual realizada en el ensayo de Riedel Weber, se puede afirmar que se notó desprendimiento entre el agregado fino (vidrio) y el asfalto en el tubo de prueba con la concentración de grado 7.

Fuente: Elaboración propia

Como resumen de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos de caracterización se expone la siguiente tabla:

Tabla 45: Resumen de resultados de caracterización para agregados

Ensayo	Resultado	Normativa	
Agregado grueso			
Método para determinar la granulometría. (ASTM E 40 – AASHTO T27-99). A0506	*	-	
Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles. (ASTM E 131 AASHTO T96-99). A0511	27,626%	< 40%	
Densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos. (ASTM E 127 AASHTO T85-91). A0519	*	-	
Caras fracturadas en agregados gruesos. A0508	95,9%	> 75%	
Método de los sulfatos para determinar la desintegración. (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516	3,09%	< 12%	
Adherencia agregado – ligante asfáltico. (ASTM D 1664). A0701	99%	> 95%	
Agregado fino			
Método para determinar la granulometría. (ASTM E 40 – AASHTO T27-99). A0506	Arena	*	-
	Vidrio		
	Arena + vidrio		
	Filler		
Equivalente de arena. (ASTM D 2419 AASHTO T176-00). A0509	Arena	91,7 %	> 45%
	Vidrio	86,8 %	
	Arena+5% vidrio	91,4 %	
	Arena+10% vidrio	90,3 %	
	Arena+15% vidrio	88,5 %	
	Arena+20% vidrio	88,1 %	
Método de los sulfatos para determinar la desintegración (ASTM E 88 AASHTO T104-99). A0516	Arena	5,91 %	< 12%
	Vidrio	0,81 %	
	Arena+10% vidrio	5,45 %	
	Arena+15% vidrio	4,98 %	
Densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128 AASHTO T84-00). A0520.	Arena	*	-
	Vidrio		
	Arena + vidrio		
Adherencia agregado – ligante asfáltico (Riedel – Weber). A0118	Arena	Grado 8	> Grado 1
	Vidrio	Grado 7	
Filler			
Método para determinar la granulometría del filler. A0502	Cemento Portland	*	-

* Datos expuestos en tablas anteriores

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Caracterización del cemento asfáltico

Por condiciones de disponibilidad con los equipos necesarios para realizar los ensayos de caracterización del cemento asfáltico, se realizó las correspondientes pruebas en el Laboratorio de Asfaltos de la Universidad Juan Misael Saracho de la ciudad de Tarija. Los ensayos realizados fueron basados en el “Manual de ensayos y materiales asfálticos” elaborado por la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.), y se describen a continuación:

Tabla 46: Caracterización del cemento asfáltico

Cemento asfáltico	Método para determinar el peso específico (ASTM D71-94 AASHTO T229-97). A0102
	Método de ensaye de penetración (ASTM D 5 AASHTO T49-97). A0103
	Método para determinar la ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T51-00). A0105
	Método para determinar los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01 AASHTO T79-96). A0106
	Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 AASHTO T53-96). A0110
	Método de ensaye de película delgada (ASTM D 1754 AASHTO T179-05). A0120

Fuente: Elaboración propia

Tabla 47: Caracterización del cemento asfáltico 85/100

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Prom	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Peso picnómetro	gr	37,9	37,8			
Peso picnómetro + agua (25° C)	gr	62,8	62,6			
Peso picnómetro + muestra	gr	59,7	59,6			
Peso picnómetro + agua + muestra	gr	62,1	62,8			
Peso específico	gr/cm ³	1,013	1,009	1,011	1	1,05
Punto de inflamación AASHTO T-48	°C	283	280	281,5	>232	
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm	86	86	86	75	
Penetración a 25°C, 100s, 5seg. (0,1 mm) AASHTO T-49	Lectura N° 1	93	92			
	Lectura N° 2	91	90			
	Lectura N° 3	-	-			
	Promedio	mm	92	91	91,5	85
Viscosidad Saybolt 135°C AASHTO T-72	seg	No se realizó			85	
Ensayo de la mancha		No se realizó			Negativo	
Solubilidad de tricloroeliteno AASHTO T-44	%	No se realizó			99	
Penetración al residuo de pérdida por calentamiento % del original	%	No se realizó			50	
Solvente gasolina standart		No se realizó			Negativo	
Solvente gasolina - xilol, % xilol		No se realizó			Negativo	
Solvente heptano - xilol, % xilol		No se realizó			Negativo	
Pérdida por calentamiento	%	No se realizó				1
Ensayo de película delgada en horno, 163°C, 5 hrs.		No se realizó				
* Pérdida en masa	%	0,32	0,28	0,3		1
* Penetración del residuo, penetración original	%	62	63	62,5	47	
Porcentaje de agua	%	No se realizó				0,2
índice de susceptibilidad térmica		No se realizó			-1	1
Punto de ablandamiento	°C	43,5	43,8	44	43	53

Fuente: Elaboración propia

3.5. Diseño Marshall de mezclas asfálticas

En esta etapa tiene lugar el diseño en laboratorio de mezclas bituminosas con la incorporación de residuos de vidrio molido como sustitutivo de la arena en diferentes porcentajes. Como ya se indicó en el capítulo anterior, la mezcla seleccionada para llevar a cabo el estudio fue una mezcla continua densa.

Los trabajos previos coadyuvaron para realizar el diseño de cinco fórmulas de trabajo, cuatro de ellas con el residuo incorporado, y otra, únicamente con áridos convencionales a modo de referencia. Los resultados obtenidos pondrán de manifiesto la posibilidad de fabricar mezclas bituminosas con residuos de vidrio molido como sustitutos del árido fino, capaz de cumplir con las exigencias establecidas por la normativa para mezclas de capa de rodadura.

Como partida de los trabajos de laboratorio, se determinaron las granulometrías y porcentajes óptimos de betún a emplear en cada fórmula de trabajo, en base a las características recogidas para este tipo de mezclas. Para poder establecer un análisis más explícito de los resultados obtenidos durante el diseño de éstas, se recogerán cada una de ellas por separado. Se comenzará por el análisis de la mezcla convencional de referencia, y posteriormente se pasará a las mezclas con residuos de vidrio molido incorporados.

3.5.1. Mezcla convencional

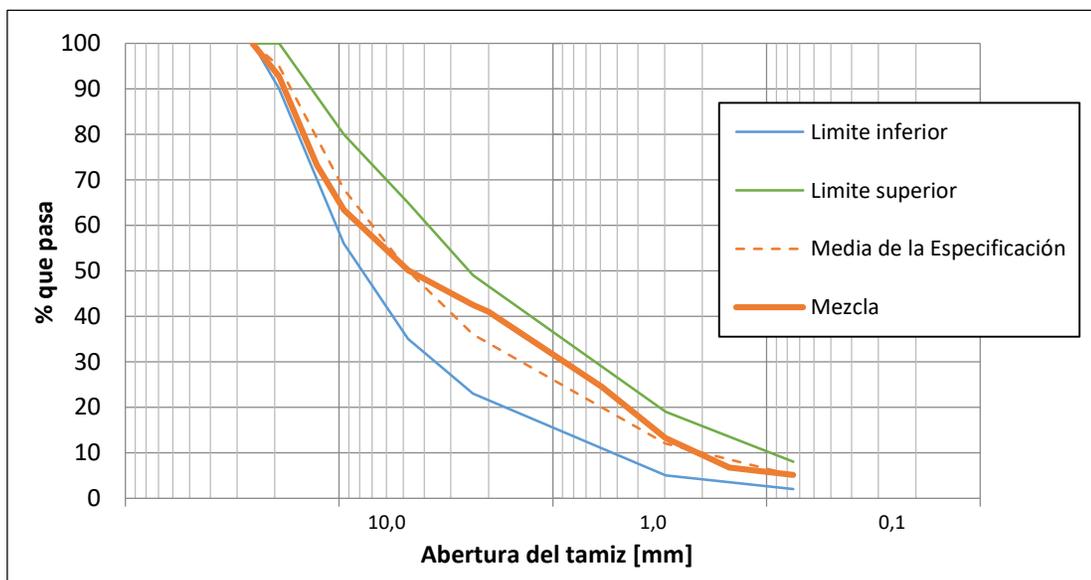
La primera mezcla diseñada fue la convencional de forma que los resultados obtenidos en ésta pudieran servir de referencia para las otras mezclas a estudiar. En base a las granulometrías de los áridos y el cemento para el filler, se realizó el ajuste granulométrico de la fórmula de trabajo de la mezcla para que cumpliera con el huso establecido para las mezcla. El encaje se realizó en peso, y los porcentajes a añadir de cada material fueron un 48% de agregado grueso, un 47% de arena y 5 % de cemento Portland. La curva granulométrica resultante es la siguiente:

Tabla 48: Granulometría mezcla convencional

Tamiz N°	Grava % Pasa	Arena % Pasa	Filler % Pasa	Abertura Tamiz mm	Especificaciones % que pasa (Tamaño máximo nominal 3/4")			Mezcla
					Mínimo	Máximo	Media	
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	38,1	100		100	100
1"	100,00	100,00	100,00	25,4	100		100	100
3/4"	84,97	100,00	100,00	19,1	90	100	95	92,8
1/2"	44,39	100,00	100,00	12,7	-		-	73,3
3/8"	17,59	100,00	100,00	9,5	56	80	68	63,4
N° 4	2,63	93,18	100,00	4,8	35	65	50	50,1
N° 8	0,15	79,68	100,00	2,4	23	49	36	42,5
N° 10	0,04	76,65	100,00	2,0	-		-	41
N° 16	0,00	68,04	100,00	1,2	-		-	34
N° 30	0,00	45,68	100,00	0,59	-		-	24,5
N° 50	0,00	17,46	100,00	0,297	5	19	12	13,2
N° 100	0,00	3,56	99,60	0,149	-		-	6,7
N° 200	0,00	0,40	97,40	0,075	2	8	5	5,1
	48%	47%	5%	- Porcentajes usados en la mezcla -				

Fuente: Elaboración propia

Figura 17: Curva granulométrica – mezcla convencional



Fuente: Elaboración propia

Para determinar el contenido óptimo de ligante a añadir a la mezcla, se realizó el ensayo Marshall con cinco series de tres probetas, variando los contenidos de cada serie entre 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6% sobre el peso de los áridos. Las características principales del ensayo fueron las siguientes:

Tabla 49: Resultados obtenidos del ensayo Marshall – mezcla convencional

Dosificación	Grava	Arena	Filler	Vidrio molido
% de agregados	48%	47%	5%	-

Propiedades de la mezcla para diferentes % de cemento asfáltico

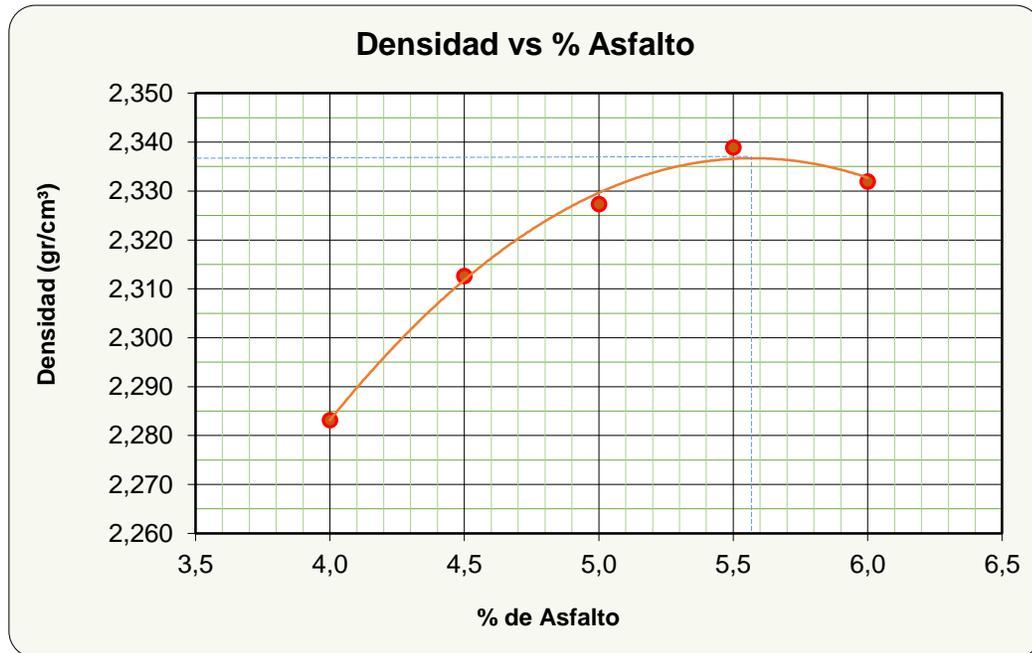
Porcentaje de cemento asfáltico	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	Especificaciones

Densidad (gr/cm ³)	2.283	2.313	2.327	2.339	2.332	-
Estabilidad (lb)	1612.9	1992.1	2285.0	2251.8	2070.7	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	7.37	5.47	4.17	2.98	2.56	3 – 5
VAM (%)	16.41	15.77	15.68	15.70	16.40	> 15
RBV (%)	55.06	65.29	72.42	80.04	84.30	65 – 75
Flujo (1/100")	8.00	9.33	10.33	12.67	15.33	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

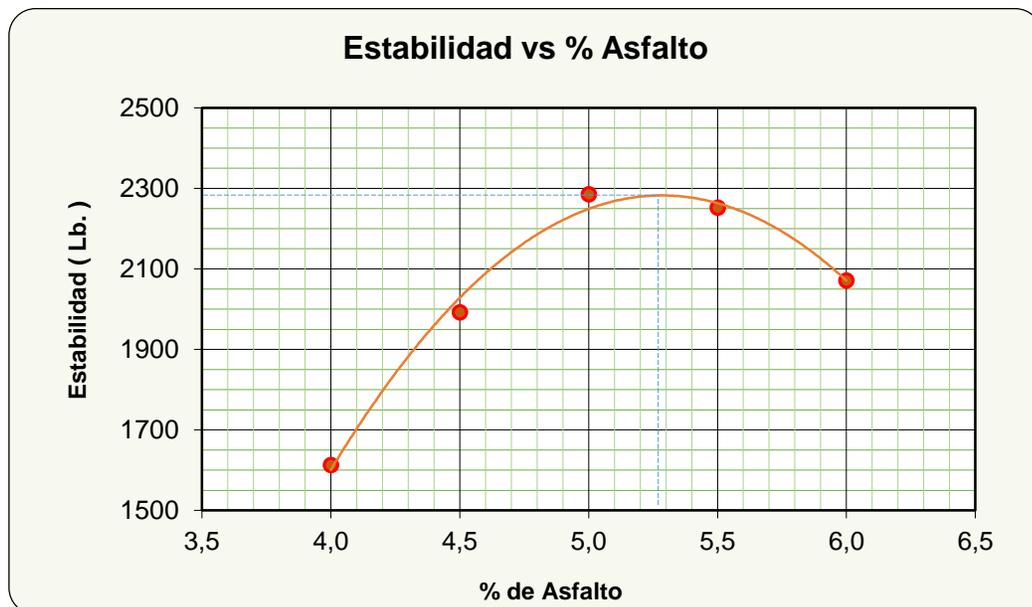
Finalmente con todos los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 18: Curva de densidad Marshall – mezcla convencional



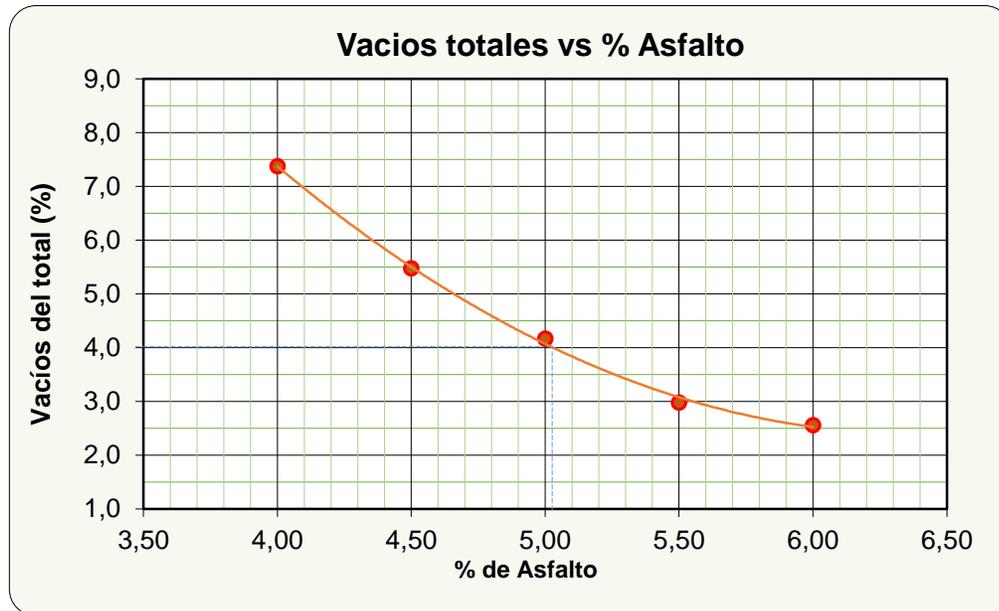
Fuente: Elaboración propia

Figura 19: Curva de estabilidad Marshall – mezcla convencional



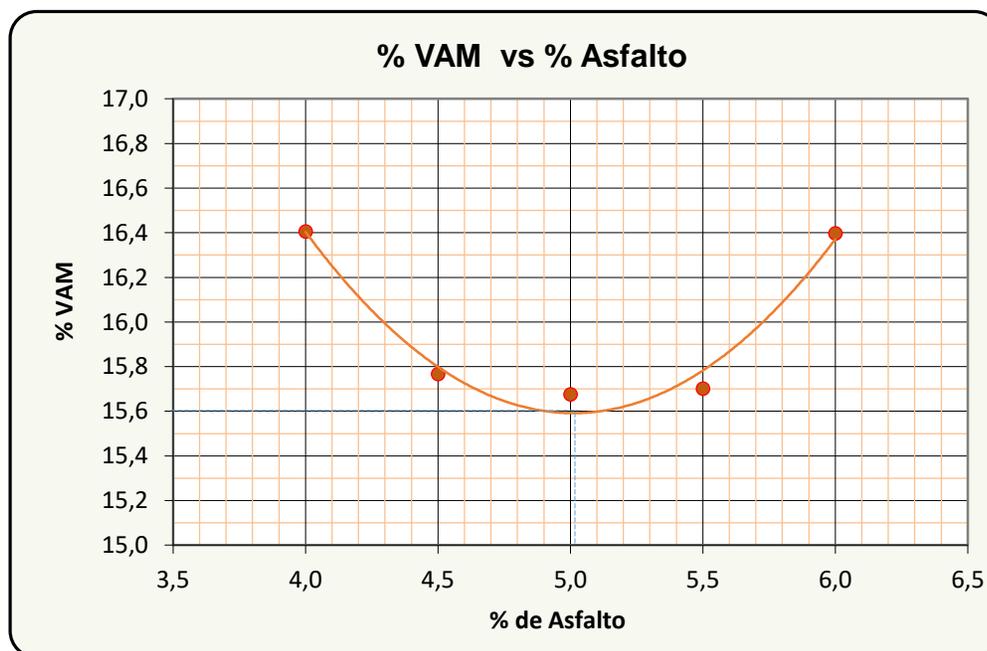
Fuente: Elaboración propia

Figura 20: Vacíos de la mezcla – mezcla convencional



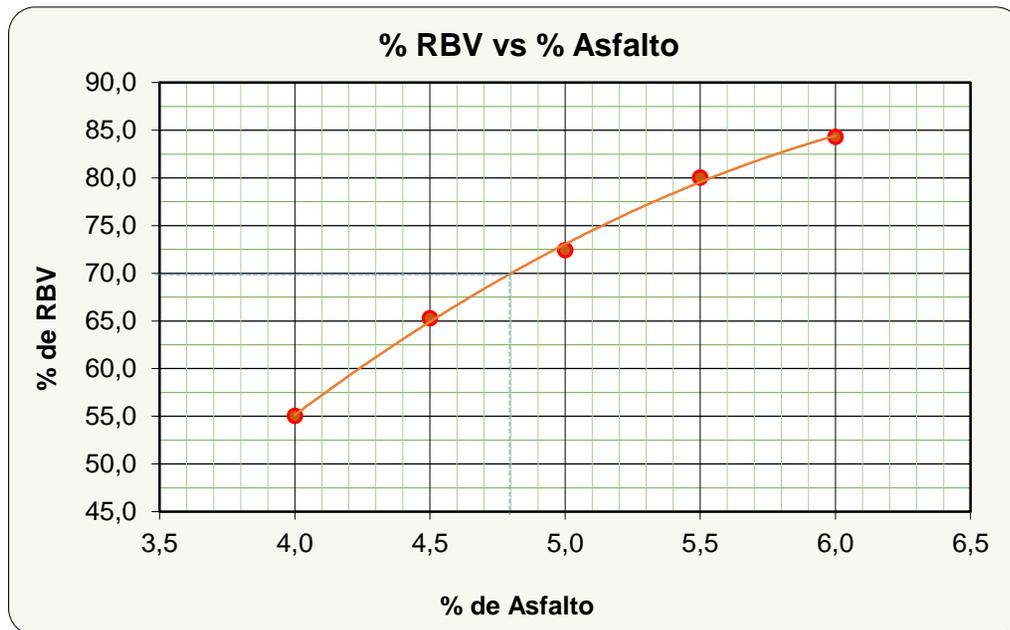
Fuente: Elaboración propia

Figura 21: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral – mezcla convencional



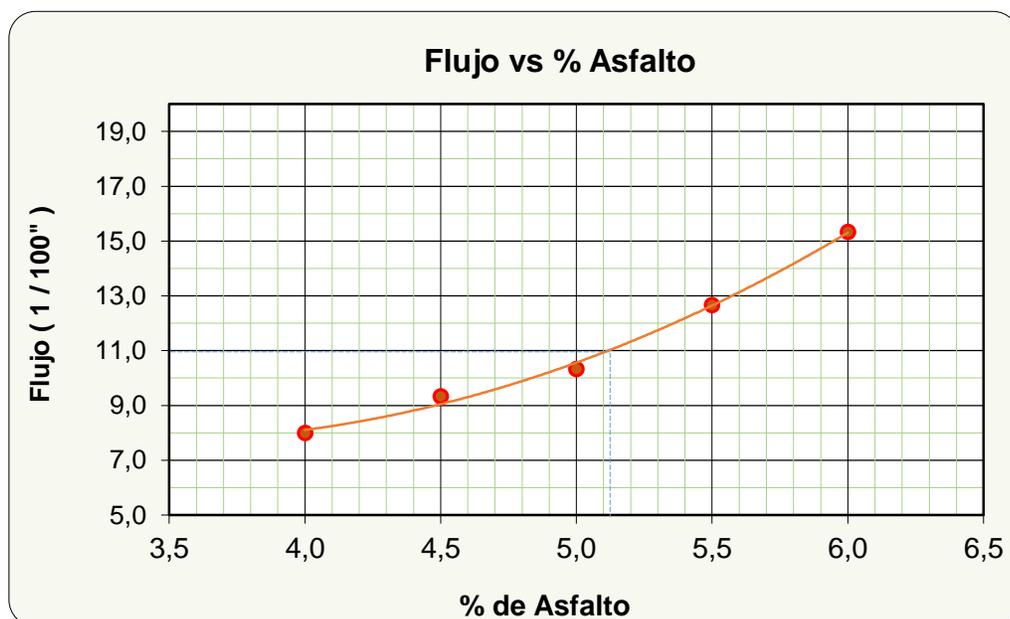
Fuente: Elaboración propia

Figura 22: Relación betún vacíos – mezcla convencional



Fuente: Elaboración propia

Figura 23: Curva de fluencia – mezcla convencional



Fuente: Elaboración propia

Tabla 50: Valores obtenido de gráficos para el diseño Marshall - mezcla convencional

Valores obtenido de gráficos				
Características	% de asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,57	2,337	-----	-----
% Vacíos	5,03	4,0	3	5
R.B.V. (%)	4,80	70,0	65	75
V.A.M (%)	5,01	15,6	> 15	
Estabilidad (lb)	5,28	2282,8	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,12	11,0	8	14
Promedio (%)	5,10	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las graficas		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 51: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - mezcla convencional

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,10	2,333	-----	-----
% Vacíos	5,10	3,76	3	5
R.B.V. (%)	5,10	74,99	65	75
V.A.M (%)	5,10	15,60	> 15	
Estabilidad (lb)	5,10	2274	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,10	11,07	8	14
% óptimo de asfalto propuesto			5,10	

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de ligante que mejor satisface las condiciones es el 5,1%, que es por tanto el contenido óptimo de ligante con el que se fabricará la mezcla convencional.

3.5.2. Mezcla con adición del residuo (5% de vidrio molido)

A partir de las diferentes granulometrías de los materiales que la forman se realiza el encaje granulométrico, con la obtención de la correspondiente curva de áridos combinados. Por tratarse de materiales con densidades semejantes, el encaje

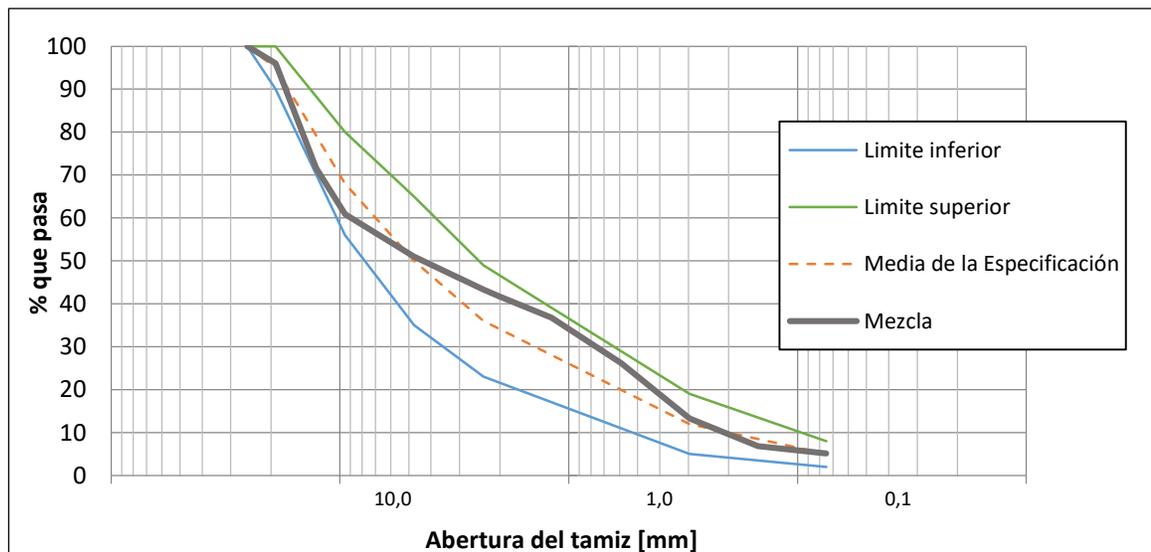
granulométrico se hizo en volumen, siendo su resultado un 46% de grava, 44% de arena, 5% de residuos de vidrio molido y un 5% de cemento.

Tabla 52: Granulometría, mezcla con adición de 5% de vidrio molido

Tamiz	Grava	Arena	Vidrio	Filler	Abert. Tamiz	Especificaciones % que pasa (Tamaño máximo nominal 3/4")			Mezcla
						Mínimo	Máximo	Media	
N°	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	mm				
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00	38,1	100		100	100
1"	100,00	100,00	100,00	100,00	25,4	100		100	100
3/4"	84,97	100,00	100,00	100,00	19,1	90	100	95	96
1/2"	44,39	100,00	100,00	100,00	12,7	-		-	71,6
3/8"	17,59	100,00	100,00	100,00	9,5	56	80	68	60,9
N° 4	2,63	93,18	100,00	100,00	4,8	35	65	50	51
N° 8	0,15	79,68	64,55	100,00	2,4	23	49	36	43,3
N° 10	0,04	76,65	58,97	100,00	2,0	-		-	41,7
N° 16	0,00	68,04	37,27	100,00	1,2	-		-	36,8
N° 30	0,00	45,68	21,79	100,00	0,59	-		-	26,2
N° 50	0,00	17,46	11,58	100,00	0,297	5	19	12	13,3
N° 100	0,00	3,56	4,69	99,60	0,149	-		-	6,8
N° 200	0,00	0,40	0,32	97,40	0,075	2	8	5	5,1
	46%	44%	5%	5%	- Porcentajes usados en la mezcla -				

Fuente: Elaboración propia

Figura 24: Curva granulométrica – mezcla con adición de 5% de vidrio molido



Fuente: Elaboración propia

Al igual que en caso anterior, la determinación del contenido óptimo de ligante a añadir a la mezcla, se realiza mediante el ensayo Marshall con tres series de tres probetas, variando los contenidos de cada serie entre 4%, 4.5% ,5%, 5.5% y 6% sobre el peso de los áridos. A continuación se recogen las medias de los resultados obtenidos en el ensayo para cada uno de los porcentajes de cemento asfáltico fueron:

Tabla 53: Resultados obtenidos del ensayo Marshall – mezcla con 5% de vidrio molido

Dosificación	Grava	Arena	Filler	Vidrio molido
% de agregados	46%	44%	5%	5%

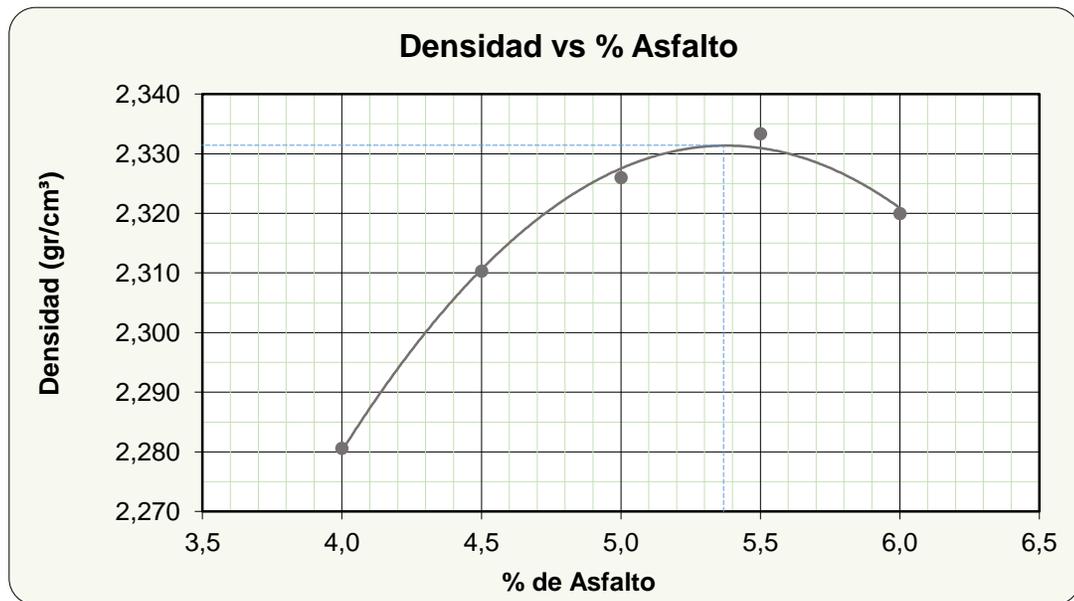
Propiedades de la mezcla para diferentes % de cemento asfáltico

Porcentaje de cemento asfáltico	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	Especificaciones
Densidad (gr/cm ³)	2.281	2.310	2.326	2.333	2.320	-
Estabilidad (lb)	1677.3	2059.4	2328.5	2352.6	2130.3	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	7.06	5.15	4.20	3.29	2.65	3 – 5
VAM (%)	16.08	15.73	15.71	15.98	16.41	> 15
RBV (%)	56.10	67.26	73.24	79.41	83.89	65 - 75
Flujo (1/100")	8.00	9.00	10.67	13.67	15.67	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

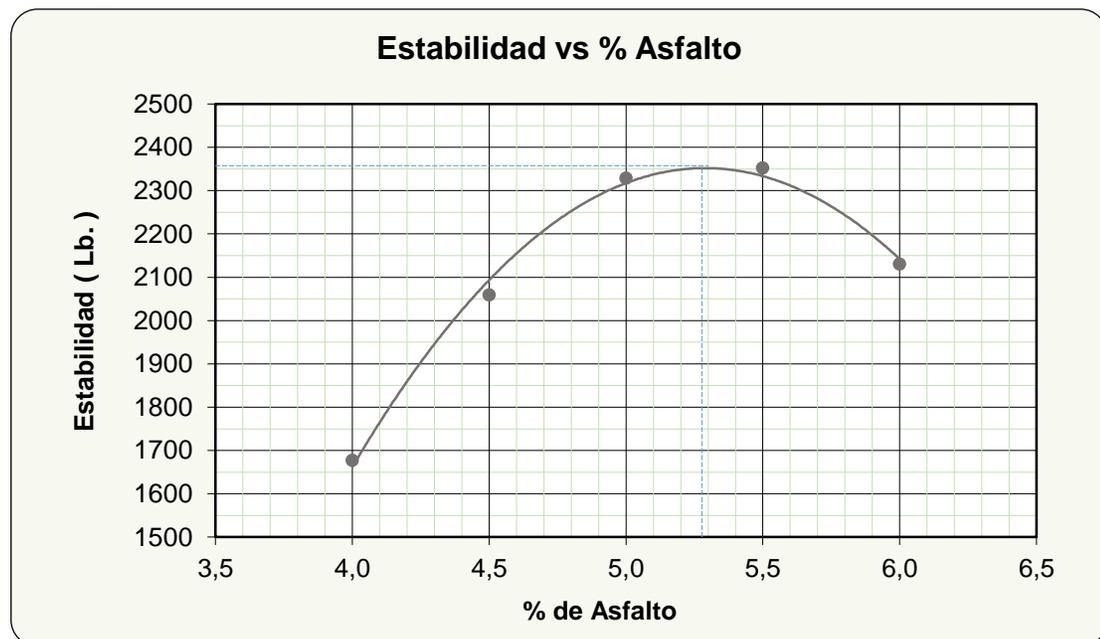
Igualmente con todos los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 25: Curva de densidad Marshall – mezcla con 5% de vidrio molido



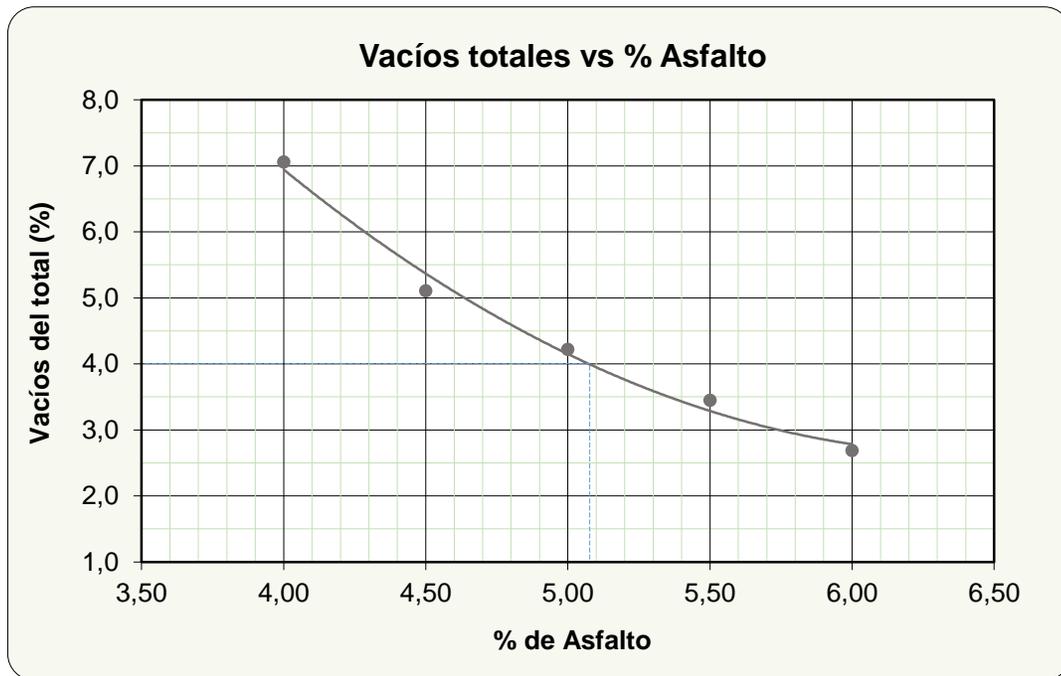
Fuente: Elaboración propia

Figura 26: Curva de estabilidad Marshall – mezcla con 5% de vidrio molido



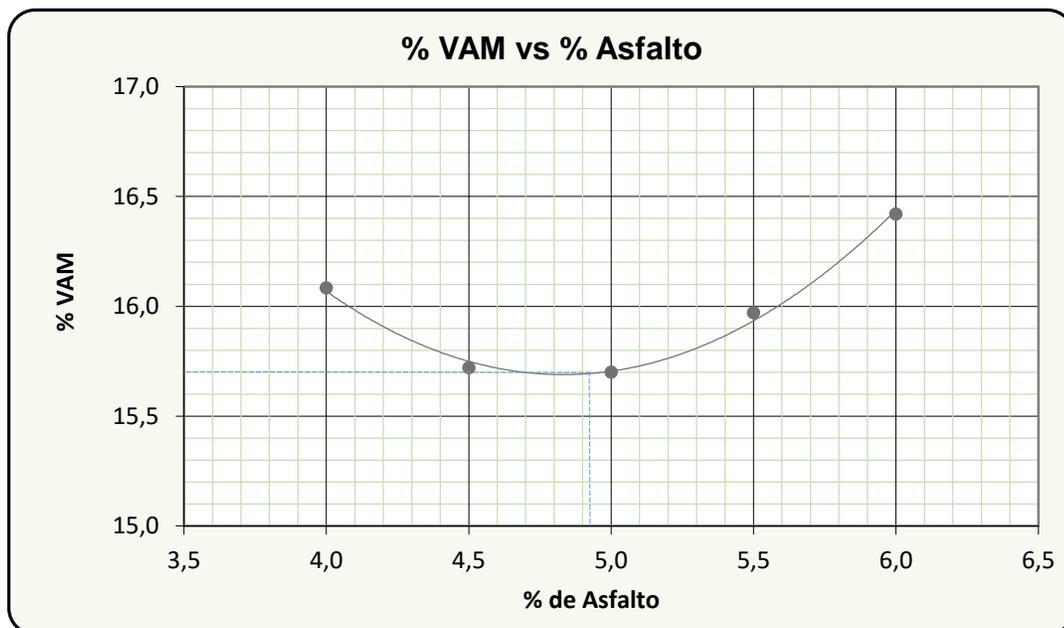
Fuente: Elaboración propia

Figura 27: Vacíos de la mezcla – mezcla con 5% de vidrio molido



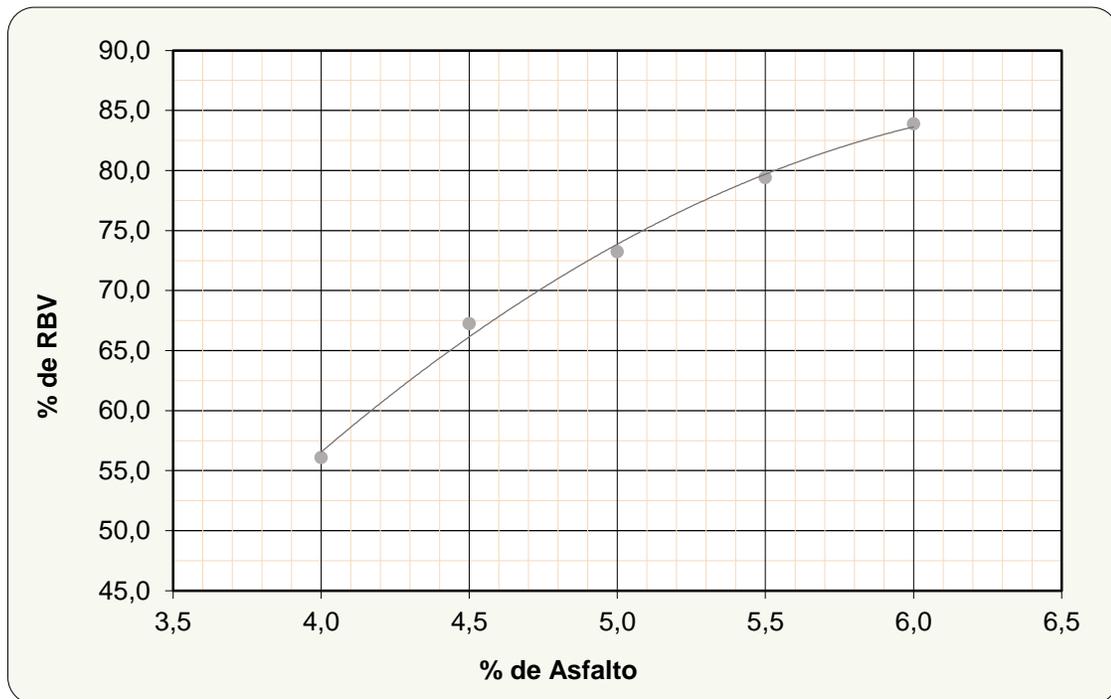
Fuente: Elaboración propia

Figura 28: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral – mezcla con 5% de vidrio molido



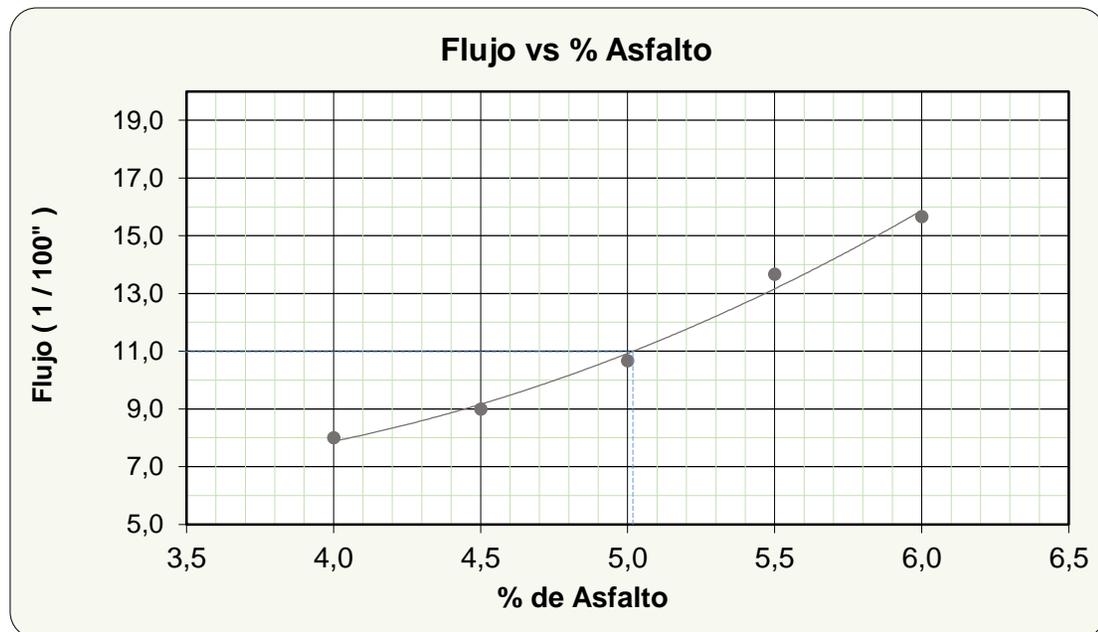
Fuente: Elaboración propia

Figura 29: Relación betún vacíos – mezcla con 5% de vidrio molido



Fuente: Elaboración propia

Figura 30: Curva de fluencia – mezcla con 5% de vidrio molido



Fuente: Elaboración propia

Tabla 54: Valores obtenido de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con 5% de vidrio molido

Valores obtenido de gráficos				
Características	% de asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,37	2,331	-----	-----
% Vacíos	5,05	4,0	3	5
R.B.V. (%)	4,74	70,0	65	75
V.A.M (%)	4,88	15,7	> 15	
Estabilidad (lb)	5,29	2351,8	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,02	11,0	8	14
Promedio (%)	5,06	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las graficas		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 55: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - 5% de residuos de vidrio molido

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,06	2,328	-----	-----
% Vacíos	5,06	3,98	3	5
R.B.V. (%)	5,06	74,62	65	75
V.A.M (%)	5,06	15,73	> 15	
Estabilidad (lb)	5,06	2330	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,06	11,16	8	14
% Óptimo de asfalto propuesto			5,06	

Fuente: Elaboración propia

Las densidades de las probetas son muy semejantes que las de la mezcla de referencia, ello es debido a la proximidad que existe en cuanto a la densidad del residuo y los materiales pétreos. En base a los resultados obtenidos de estabilidad y huecos en mezcla, el porcentaje óptimo de betún seleccionado fue de 5.06%.

3.5.3. Mezcla con adición del residuo (10% de vidrio molido)

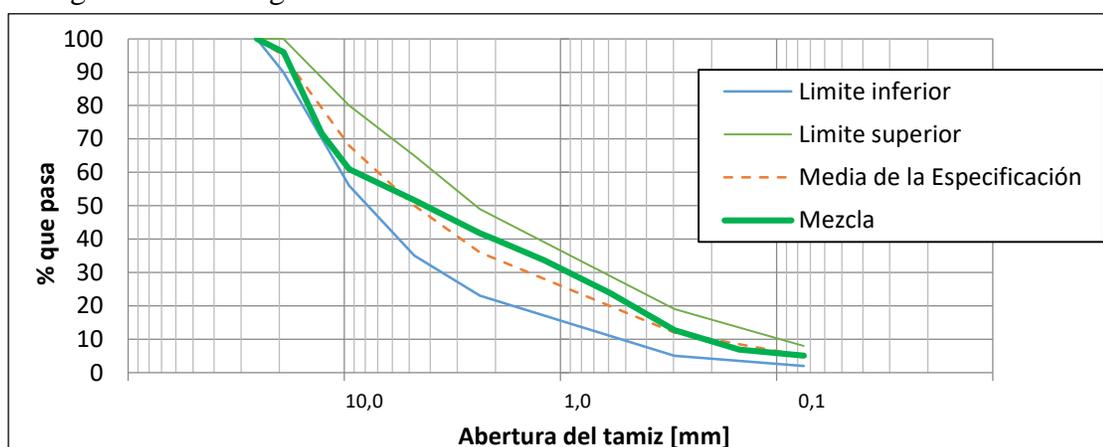
La dosificación obtenida tras la realización del encaje granulométrico realizado en peso fue de 46% de grava, 39% de arena, 10% de residuos de vidrio molido y un 5% de cemento. La curva granulométrica obtenida fue:

Tabla 56: Granulometría, mezcla con adición de 10% de vidrio molido

Tamiz N°	Grava % Pasa	Arena % Pasa	Vidrio % Pasa	Filler % Pasa	Abert. Tamiz mm	Especificaciones % que pasa (Tamaño máximo nominal 3/4")			Mezcla
						Mínimo	Máximo	Media	
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00	38,1	100		100	100
1"	100,00	100,00	100,00	100,00	25,4	100		100	100
3/4"	84,97	100,00	100,00	100,00	19,1	90	100	95	96
1/2"	44,39	100,00	100,00	100,00	12,7	-		-	71,6
3/8"	17,59	100,00	100,00	100,00	9,5	56	80	68	60,9
N° 4	2,63	93,18	100,00	100,00	4,8	35	65	50	51,4
N° 8	0,15	79,68	64,55	100,00	2,4	23	49	36	42,5
N° 10	0,04	76,65	58,97	100,00	2,0	-		-	40,8
N° 16	0,00	68,04	37,27	100,00	1,2	-		-	35,3
N° 30	0,00	45,68	21,79	100,00	0,59	-		-	25,0
N° 50	0,00	17,46	11,58	100,00	0,297	5	19	12	13,0
N° 100	0,00	3,56	4,69	99,60	0,149	-		-	6,9
N° 200	0,00	0,40	0,32	97,40	0,075	2	8	5	5,1
	46%	39%	10%	5%	- Porcentajes usados en la Mezcla -				

Fuente: Elaboración propia

Figura 31: Curva granulométrica – mezcla con adición de 10% de vidrio molido



Fuente: Elaboración propia

Los porcentajes de betún utilizados en la obtención del contenido óptimo de ligante fueron 4,0%, 4,5%, 5%, 5,5% y 6% sobre el peso de los áridos. Las características del ensayo Marshall son las mismas que en los casos anteriores:

Tabla 57: Resultados obtenidos del ensayo Marshall – mezcla con 10% de vidrio molido

Dosificación	Grava	Arena	Filler	Vidrio molido
% de agregados	46%	39%	5%	10%

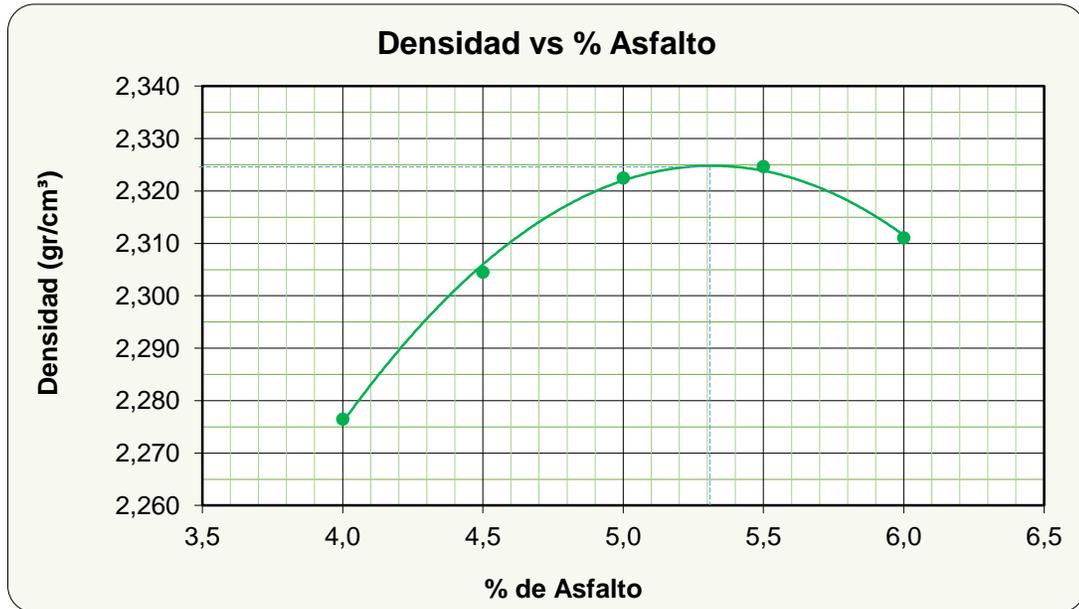
Propiedades de la mezcla para diferentes % de cemento asfáltico

Porcentaje de cemento asfáltico	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	Especificaciones
Densidad (gr/cm ³)	2.277	2.304	2.322	2.325	2.311	-
Estabilidad (lb)	1825.7	2187.2	2415.2	2327.1	2063.6	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	7.02	5.31	4.46	3.60	3.01	3 – 5
VAM (%)	16.52	15.98	15.87	16.29	16.71	> 15
RBV (%)	52.51	65.08	72.21	77.50	82.11	65 - 75
Flujo (1/100")	8.67	9.67	11.00	14.33	17.33	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

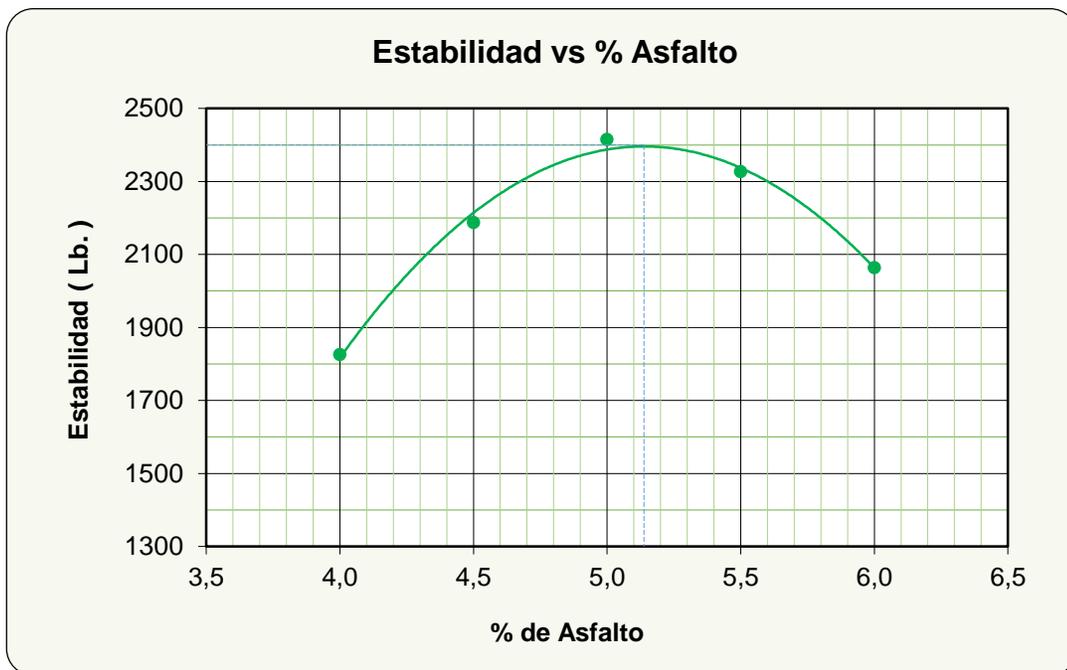
Con todos los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla, en este caso incluido el 10% de vidrio molido.

Figura 32: Curva de densidad Marshall – mezcla con 10% de vidrio molido



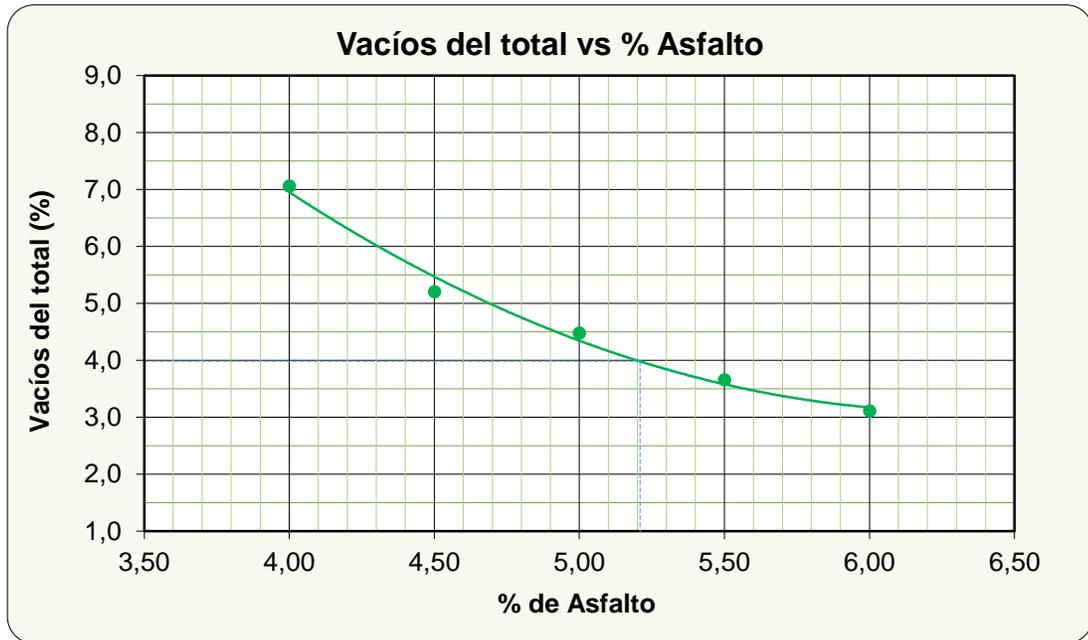
Fuente: Elaboración propia

Figura 33: Curva de estabilidad Marshall – mezcla con 10% de vidrio molido



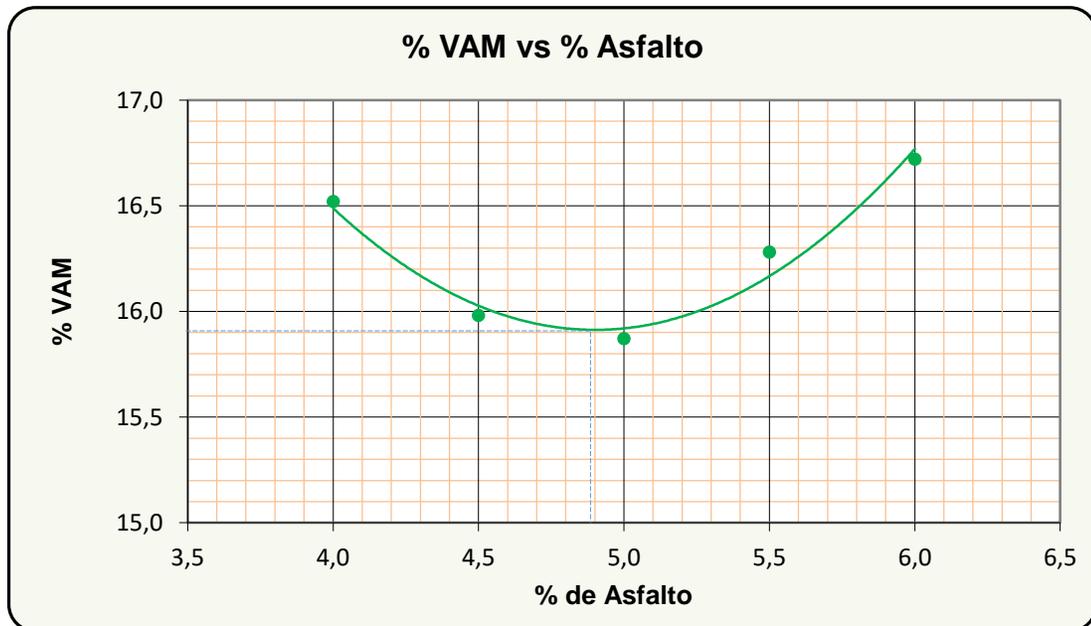
Fuente: Elaboración propia

Figura 34: Vacíos de la mezcla – mezcla con 10% de vidrio molido



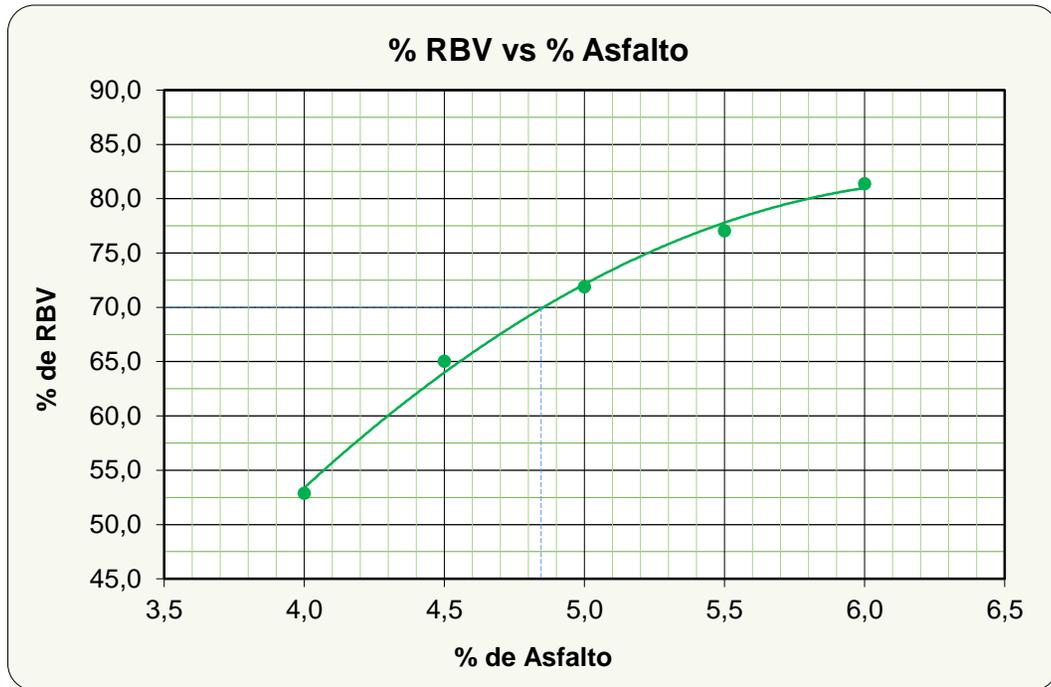
Fuente: Elaboración propia

Figura 35: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral – mezcla con 10% de vidrio molido



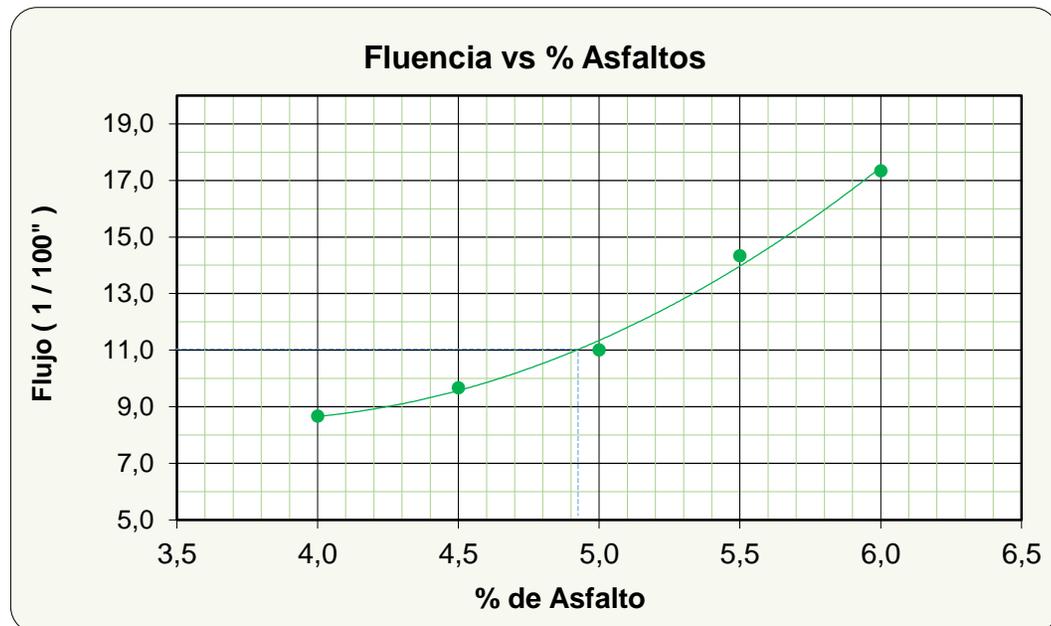
Fuente: Elaboración propia

Figura 36: Relación betún vacíos – mezcla con 10% de vidrio molido



Fuente: Elaboración propia

Figura 37: Curva de fluencia – mezcla con 10% de vidrio molido



Fuente: Elaboración propia

Tabla 58: Valores obtenido de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con 10% de vidrio molido

Valores obtenido de gráficos				
Características	% de asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,31	2,324	-----	-----
% Vacíos	5,15	4,0	3	5
R.B.V. (%)	4,82	70,0	65	75
V.A.M (%)	4,90	15,9	> 15	
Estabilidad (lb)	5,14	2395,8	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	4,92	11,0	8	14
Promedio (%)	5,04	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las graficas		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 59: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - 10% de residuos de vidrio molido

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,04	2,322	-----	-----
% Vacíos	5,04	4,29	3	5
R.B.V. (%)	5,04	73,28	65	75
V.A.M (%)	5,04	15,93	> 15	
Estabilidad (lb)	5,04	2391	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,04	11,52	8	14
% óptimo de asfalto propuesto			5,04	

Fuente: Elaboración propia

En base a estos resultados, el contenido óptimo de betún seleccionado fue el 5,04%

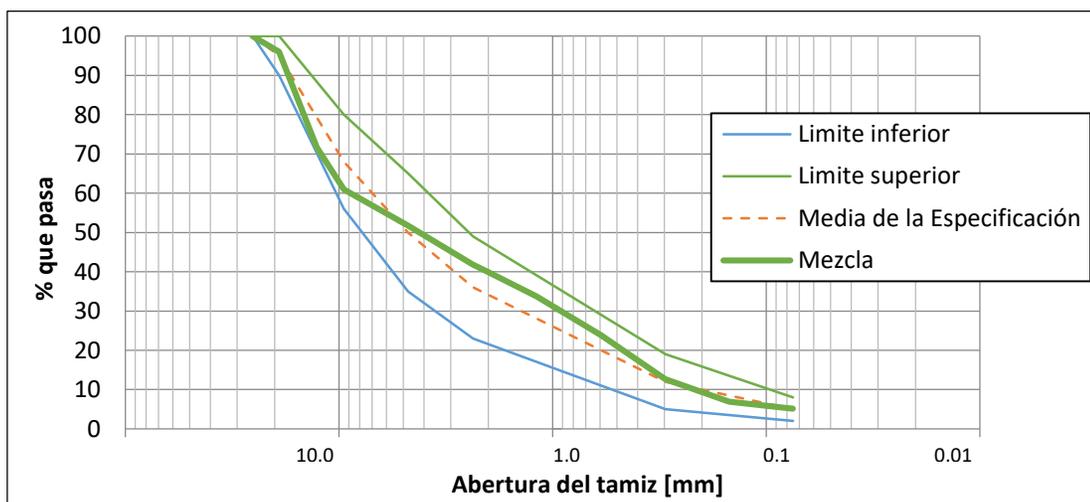
3.5.4. Mezcla con adición del residuo (15% de vidrio molido)

Tabla 60: Granulometría, mezcla con adición de 15% de vidrio molido

Tamiz	Grava	Arena	Vidrio	Filler	Abert. Tamiz	Especificaciones % que pasa (Tamaño máximo nominal 3/4")			Mezcla
						Mínimo	Máximo	Media	
N°	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	mm				
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00	38,1	100		100	100
1"	100,00	100,00	100,00	100,00	25,4	100		100	100
3/4"	84,97	100,00	100,00	100,00	19,1	90	100	95	96
1/2"	44,39	100,00	100,00	100,00	12,7	-		-	71,6
3/8"	17,59	100,00	100,00	100,00	9,5	56	80	68	60,9
N° 4	2,63	93,18	100,00	100,00	4,8	35	65	50	51,7
N° 8	0,15	79,68	64,55	100,00	2,4	23	49	36	41,8
N° 10	0,04	76,65	58,97	100,00	2,0	-		-	39,9
N° 16	0,00	68,04	37,27	100,00	1,2	-		-	33,7
N° 30	0,00	45,68	21,79	100,00	0,59	-		-	23,8
N° 50	0,00	17,46	11,58	100,00	0,297	5	19	12	12,7
N° 100	0,00	3,56	4,69	99,60	0,149	-		-	6,9
N° 200	0,00	0,40	0,32	97,40	0,075	2	8	5	5,1
	46%	34%	15%	5%	- Porcentajes usados en la mezcla -				

Fuente: Elaboración propia

Figura 38: Curva granulométrica – mezcla con adición de 15% de vidrio molido



Fuente: Elaboración propia

Los porcentajes de betún utilizados en la obtención del contenido óptimo de ligante fueron 4,0%, 4,5%, 5%, 5,5% y 6% sobre el peso de los áridos. Las características del ensayo Marshall son las mismas que en los casos anteriores:

Tabla 61: Resultados obtenidos del ensayo Marshall – Mezcla con 15% de vidrio molido

Dosificación	Grava	Arena	Filler	Vidrio molido
% de agregados	46%	34%	5%	15%

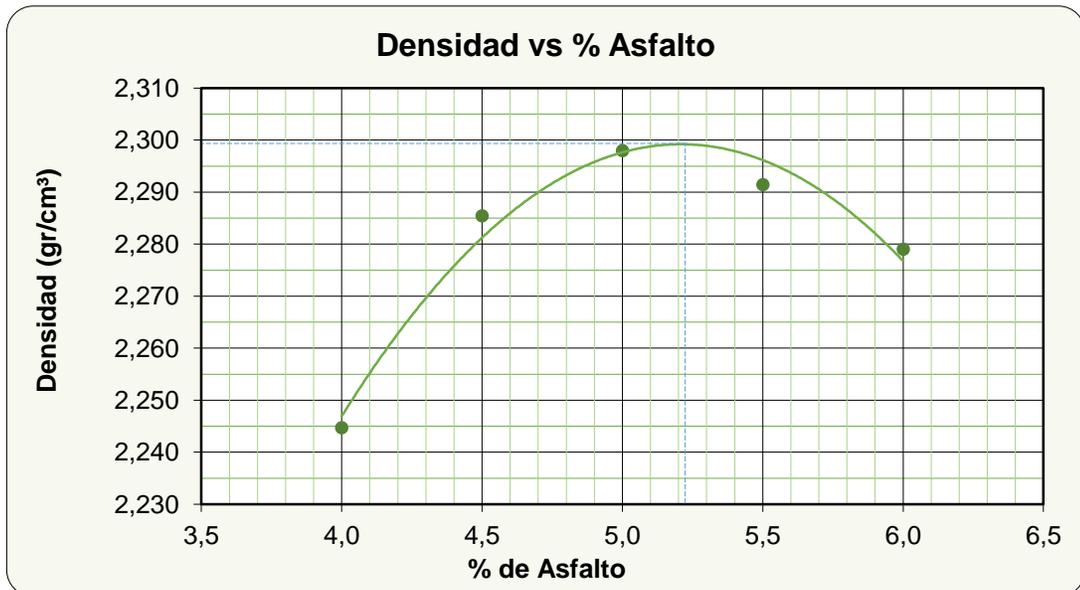
Propiedades de la mezcla para diferentes % de cemento asfáltico

Porcentaje de cemento asfáltico	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	Especificaciones
Densidad (gr/cm ³)	2.245	2.285	2.298	2.291	2.279	-
Estabilidad (lb)	1600.2	1892.4	1972.3	1824.5	1548.5	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	7.70	5.34	4.13	3.71	3.55	3 – 5
VAM (%)	16.59	15.51	15.50	16.18	17.07	> 15
RBV (%)	53.55	65.58	73.34	77.05	79.22	65 - 75
Flujo (1/100")	8.33	9.67	11.00	13.33	16.00	8 – 14

Fuente: Elaboración propia

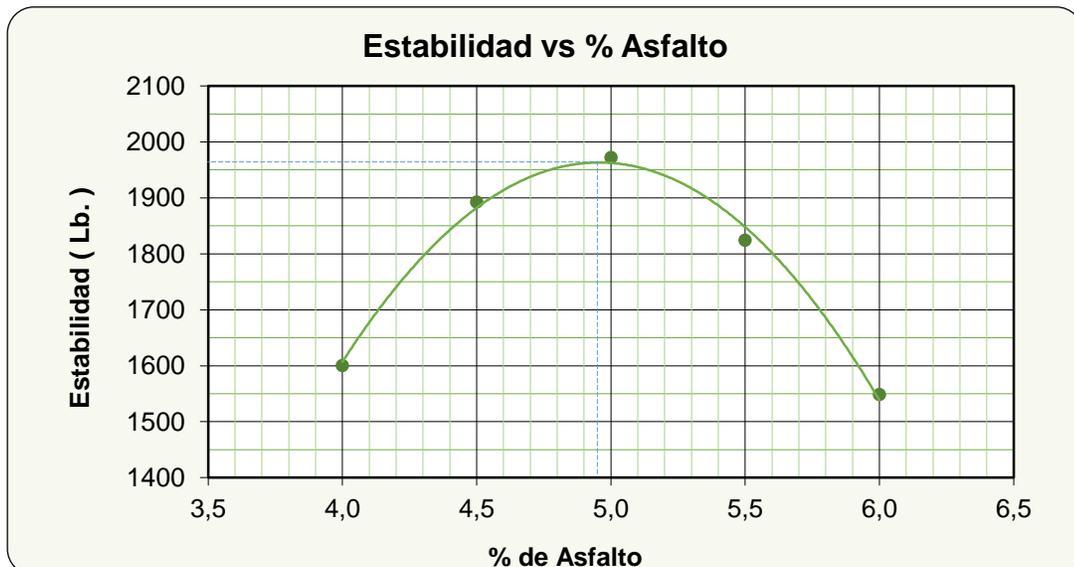
De la misma forma que en los anteriores casos, con los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 39: Curva de densidad Marshall – mezcla con 15% de vidrio molido



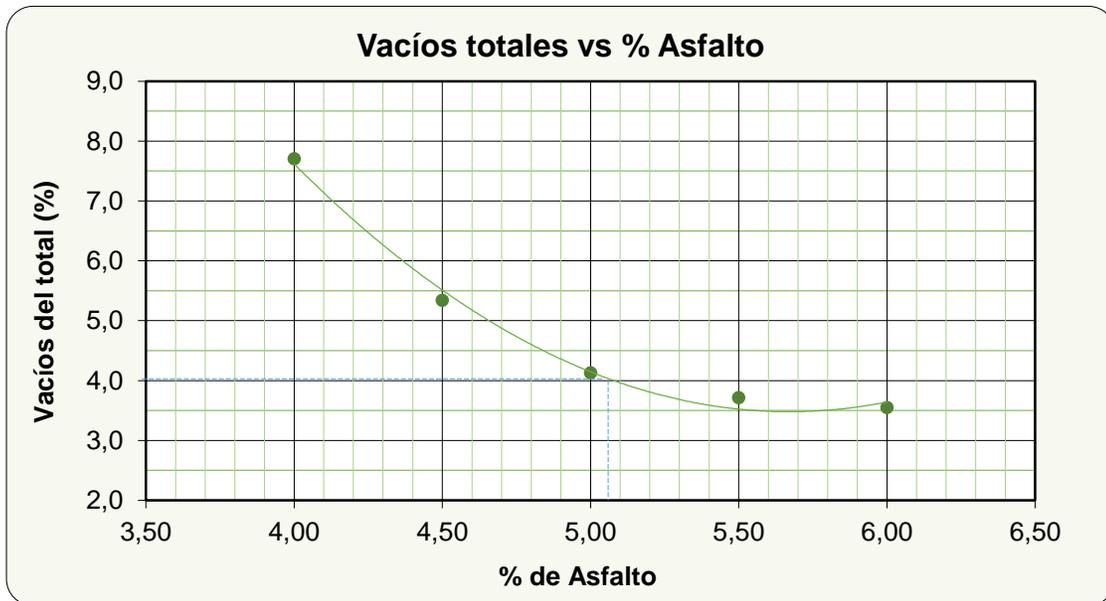
Fuente: Elaboración propia

Figura 40: Curva de estabilidad Marshall – mezcla con 15% de vidrio molido



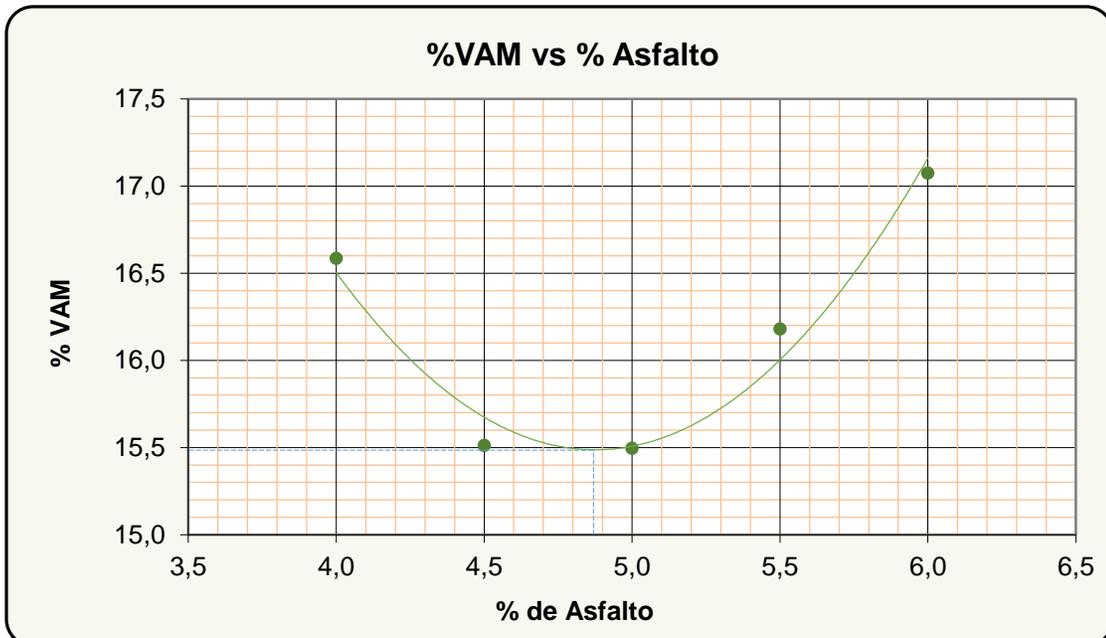
Fuente: Elaboración propia

Figura 41: Vacíos de la mezcla – mezcla con 15% de vidrio molido



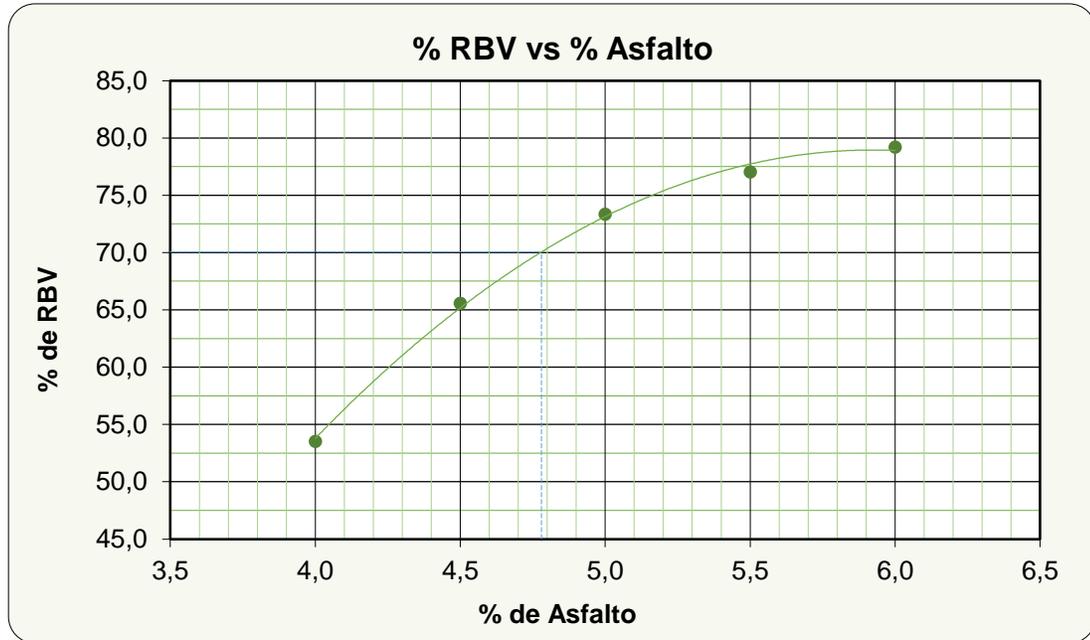
Fuente: Elaboración propia

Figura 42: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral – mezcla con 15% de vidrio molido



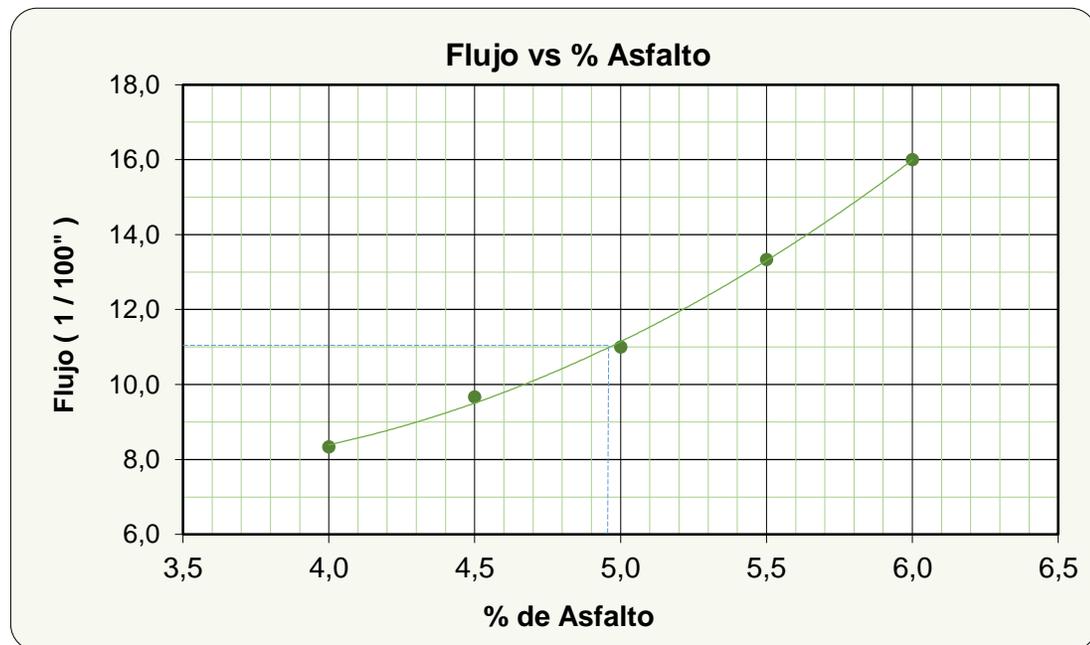
Fuente: Elaboración propia

Figura 43: Relación betún y vacíos – mezcla con 15% de vidrio molido



Fuente: Elaboración propia

Figura 44: Curva de fluencia – mezcla con 15% de vidrio molido



Fuente: Elaboración propia

Tabla 62: Valores obtenido de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con 15% de vidrio molido

Valores obtenido de gráficos				
Características	% de asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,21	2,300	-----	-----
% Vacíos	5,08	4,0	3	5
R.B.V. (%)	4,78	70,0	65	75
V.A.M (%)	4,88	15,5	> 15	
Estabilidad (lb)	4,96	1963,0	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	4,96	11,0	8	14
Promedio (%)	4,98	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las graficas		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 63: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - 15% de residuos de vidrio molido

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	4,98	2,298	-----	-----
% Vacíos	4,98	4,19	3	5
R.B.V. (%)	4,98	72,85	65	75
V.A.M (%)	4,98	15,50	> 15	
Estabilidad (lb)	4,98	1963	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	4,98	11,06	8	14
% óptimo de asfalto propuesto			4,98	

Fuente: Elaboración propia

En base a estos resultados, el contenido óptimo de betún seleccionado fue el 4,98%

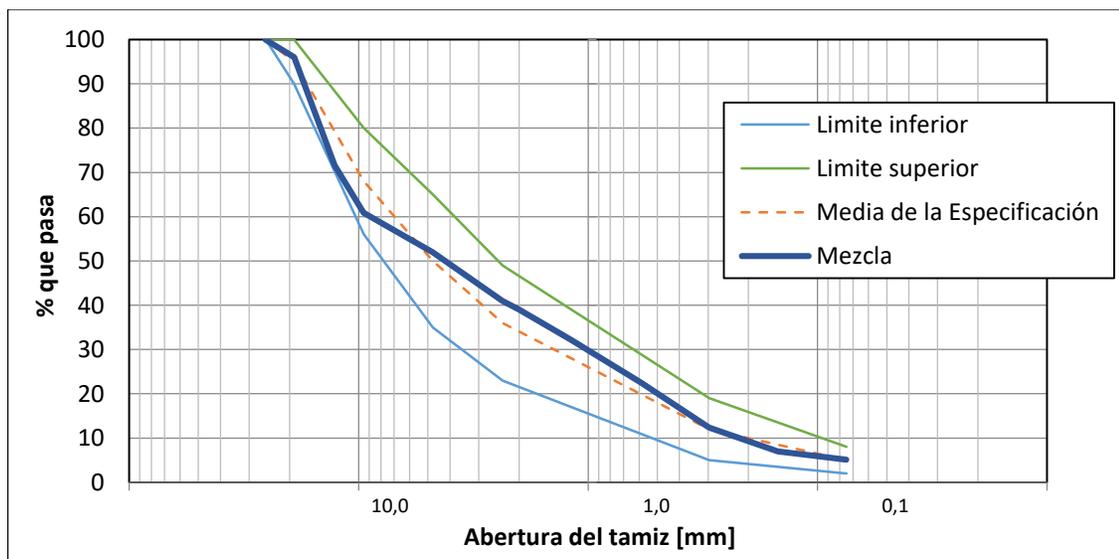
3.5.5. Mezcla con adición del residuo (20 % de vidrio molido)

Tabla 64: Granulometría, mezcla con adición de 20% de vidrio molido

Tamiz	Grava	Arena	Vidrio	Filler	Abert. Tamiz	Especificaciones % que pasa (Tamaño máximo nominal 3/4")			Mezcla
						Mínimo	Máximo	Media	
N°	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	mm				
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00	38,1	100		100	100
1"	100,00	100,00	100,00	100,00	25,4	100		100	100
3/4"	84,97	100,00	100,00	100,00	19,1	90	100	95	96
1/2"	44,39	100,00	100,00	100,00	12,7	-		-	71,6
3/8"	17,59	100,00	100,00	100,00	9,5	56	80	68	60,9
N° 4	2,63	93,18	100,00	100,00	4,8	35	65	50	52
N° 8	0,15	79,68	64,55	100,00	2,4	23	49	36	41
N° 10	0,04	76,65	58,97	100,00	2,0	-		-	39
N° 16	0,00	68,04	37,27	100,00	1,2	-		-	32,2
N° 30	0,00	45,68	21,79	100,00	0,59	-		-	22,6
N° 50	0,00	17,46	11,58	100,00	0,297	5	19	12	12,4
N° 100	0,00	3,56	4,69	99,60	0,149	-		-	7
N° 200	0,00	0,40	0,32	97,40	0,075	2	8	5	5,1
					- Porcentajes usados en la Mezcla -				
	46%	29%	20%	5%					

Fuente: Elaboración propia

Figura 45: Curva granulométrica – mezcla con adición de 20% de vidrio molido



Fuente: Elaboración propia

Las características del ensayo Marshall son las mismas que en los casos anteriores:

Tabla 65: Resultados obtenidos del ensayo Marshall – Mezcla con 20% de vidrio molido

Dosificación	Grava	Arena	Filler	Vidrio molido
% de agregados	46%	29%	5%	20%

Propiedades de la mezcla para diferentes % de cemento asfáltico

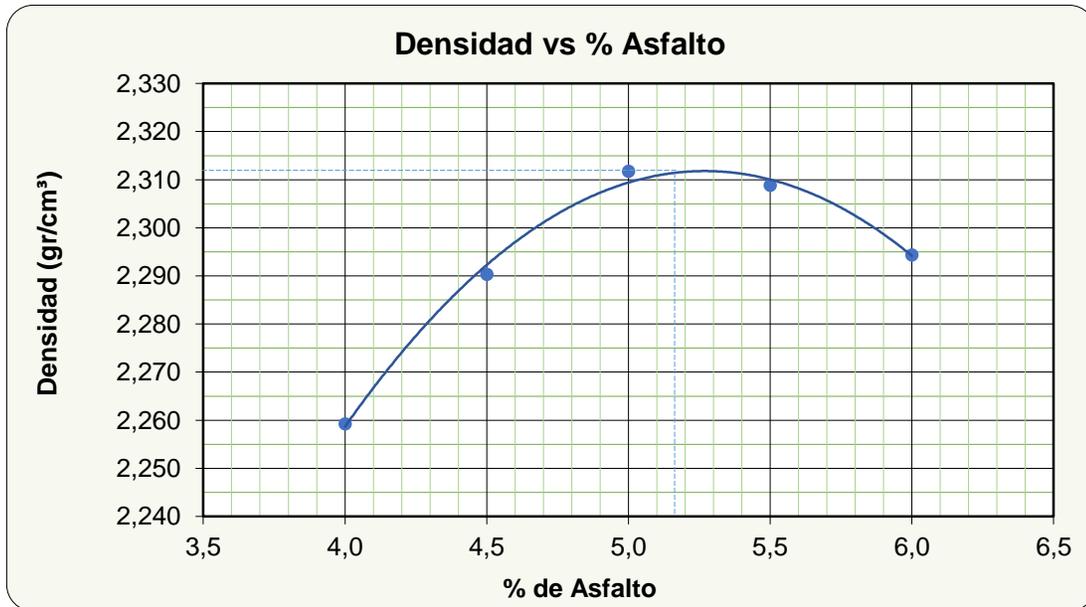
Porcentaje de cemento asfáltico	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	Especificaciones
---------------------------------	------	------	------	------	------	------------------

Densidad (gr/cm ³)	2.259	2.290	2.312	2.309	2.294	-
Estabilidad (lb)	1134.9	1482.7	1578.5	1391.4	1152.1	> 1800 lb
Vacíos totales (%)	7.93	5.97	4.39	3.81	3.72	3 – 5
VAM (%)	16.87	16.16	15.83	16.37	17.34	> 15
RBV (%)	52.98	63.08	72.24	76.71	78.55	65 - 75
Flujo (1/100")	8.33	9.33	11.00	12.67	16.00	8 - 14

Fuente: Elaboración propia

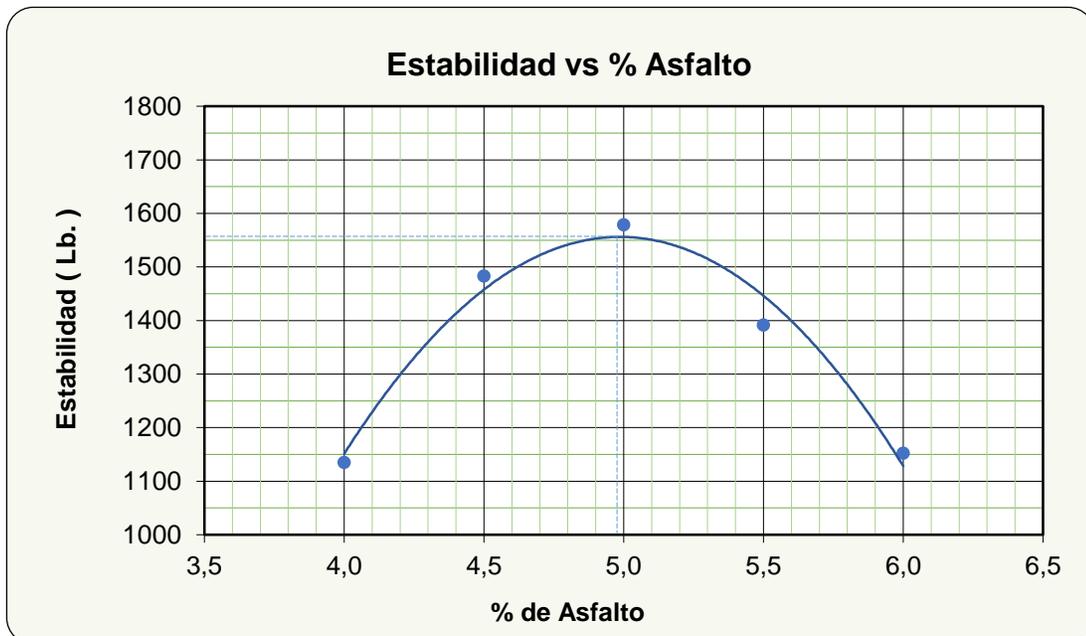
Finalmente con todos los resultados obtenidos se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall, para poder entender las características particulares de cada serie de briqueta y poder determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico necesario para la mezcla.

Figura 46: Curva de densidad Marshall – mezcla con 20% de vidrio molido



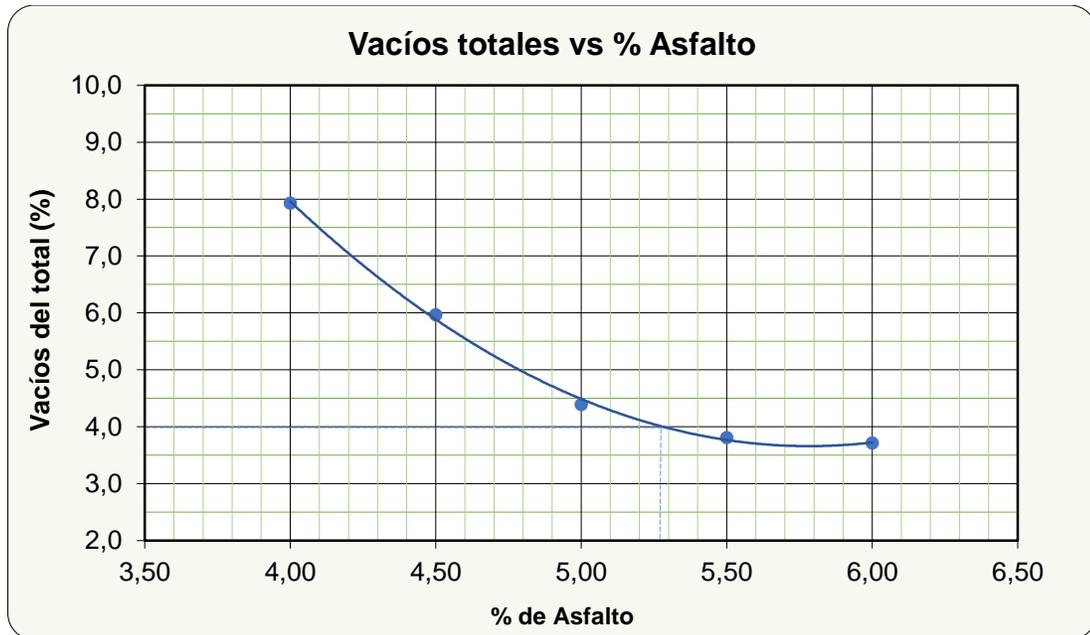
Fuente: Elaboración propia

Figura 47: Curva de estabilidad Marshall – mezcla con 20% de vidrio molido



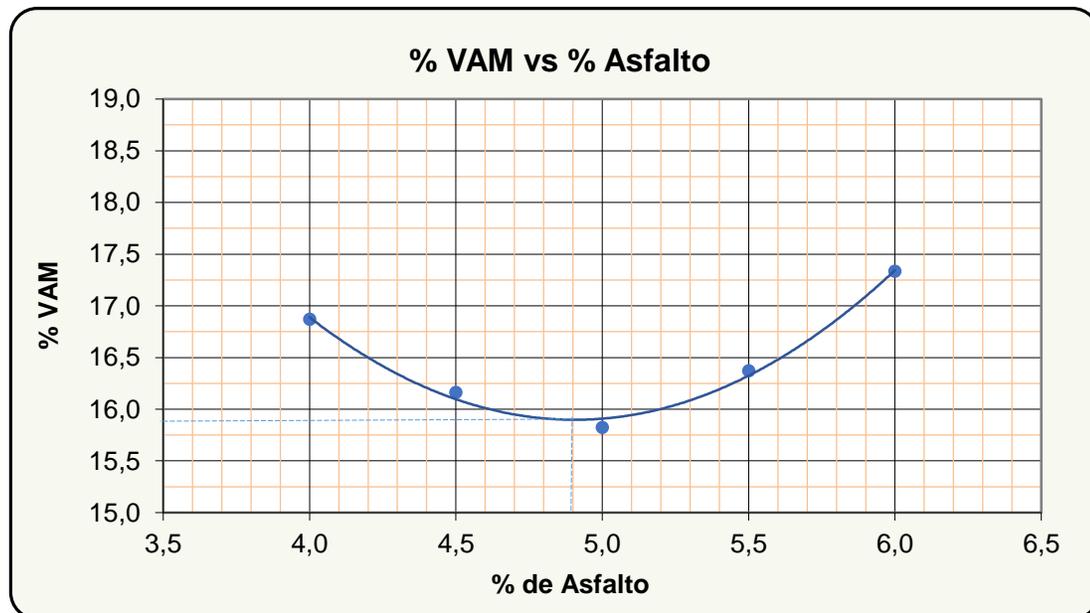
Fuente: Elaboración propia

Figura 48: Vacíos de la mezcla – mezcla con 20% de vidrio molido



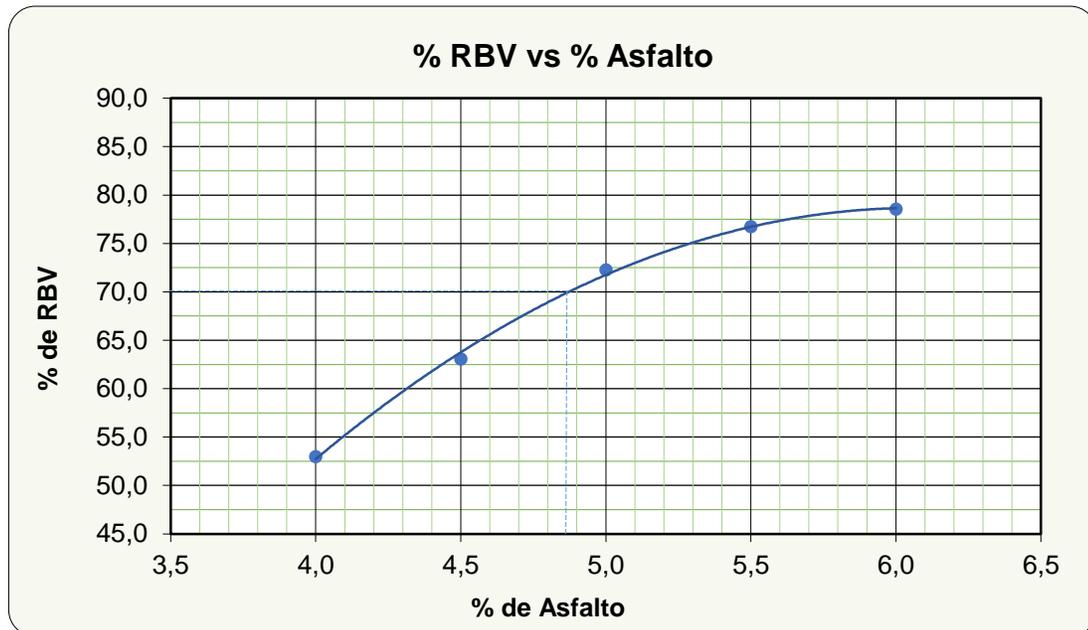
Fuente: Elaboración propia

Figura 49: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral – mezcla con 20% de vidrio molido



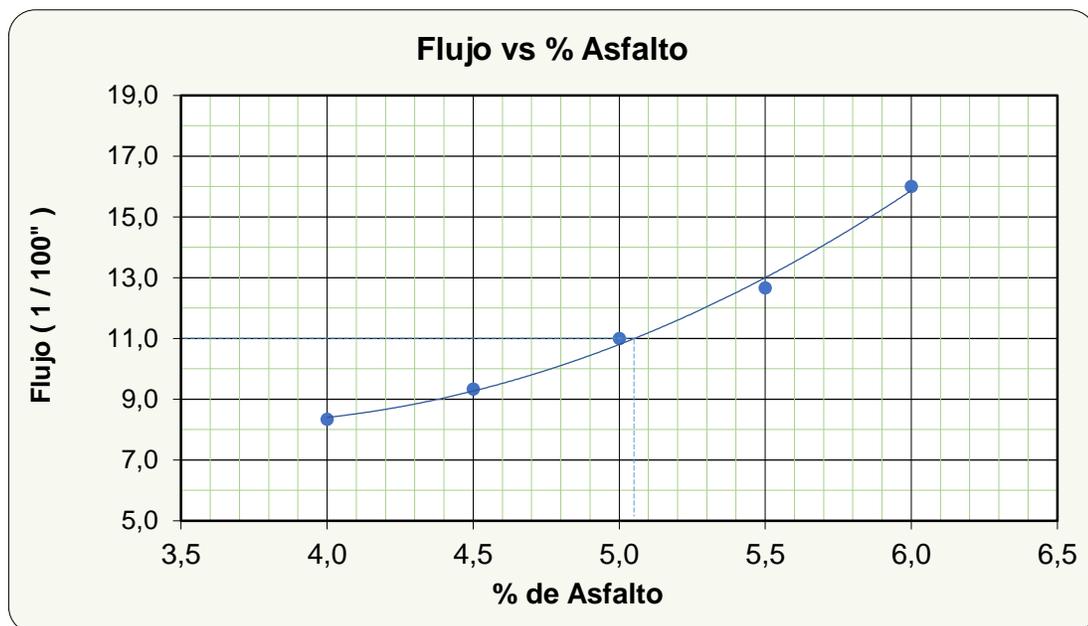
Fuente: Elaboración propia

Figura 51: Relación betún vacíos – mezcla con 20% de vidrio molido



Fuente: Elaboración propia

Figura 52: Curva de fluencia – mezcla con 20% de vidrio molido



Fuente: Elaboración propia

Tabla 66: Valores obtenido de gráficos para el diseño Marshall - mezcla con 20% de vidrio molido

Valores obtenido de gráficos				
Características	% de asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,27	2,311	-----	-----
% Vacíos	5,27	4,0	3	5
R.B.V. (%)	4,87	70,0	65	75
V.A.M (%)	4,91	15,9	> 15	
Estabilidad (lb)	4,99	1556,1	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	4,77	11,0	8	14
Promedio (%)	5,01	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las graficas		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 67: Valores con porcentaje óptimo de cemento asfáltico para el diseño Marshall - 20% de residuos de vidrio molido

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad (gr/cm ³)	5,01	2,309	-----	-----
% Vacíos	5,01	4,46	3	5
R.B.V. (%)	5,01	71,90	65	75
V.A.M (%)	5,01	15,91	> 15	
Estabilidad (lb)	5,01	1556	> 1800 lb. (75 golpes)	
Fluencia (1/100")	5,01	10,84	8	14
% óptimo de asfalto propuesto			5,01	

Fuente: Elaboración propia

En base a estos resultados, el contenido óptimo de betún seleccionado fue el 5,01%

3.6. Comparación y análisis de resultados

3.6.1. Comparación según la caracterización de materiales usados

Cuando se pretende hacer uso de los agregados pétreos para la construcción de pavimentos se deben considerar algunos aspectos fundamentales para su buen desempeño a la hora de formar parte en alguna de las capas de carreta y principalmente en la elaboración de las mezclas asfálticas.

Para el agregado grueso no resulta complicado hacer el análisis correspondiente puesto que cumple todos los requerimientos para conformar una mezcla asfáltica, e incluso presenta características superiores a las establecidas por normativa, las cuales se indican a continuación.

Tabla 68: Comparación de características principales del agregado grueso

Ensayo	Resultado	Normativa
Agregado grueso		
Método para determinar la granulometría.	*	-
Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles.	27,63%	< 40%
Densidad real, densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.	*	-
Caras fracturadas en agregados gruesos.	95,9%	> 75%
Método de los sulfatos para determinar la desintegración.	3,09%	< 12%
Adherencia agregado – ligante asfáltico.	99%	> 95%

* Datos expuestos en tablas anteriores

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en cuanto al agregado fino se debe hacer un análisis comparativo más cabal, ya que se añadirá un material considerado como desecho, vidrio molido, que cumplirá la función de la arena para mezclas asfálticas en la construcción de carreteras. Las propiedades que presenta dicho material deberán por lo menos cumplir con los límites que se establecen por normativa, ya que caso contrario no podría ser tomado en cuenta para la conformación de mezclas asfálticas.

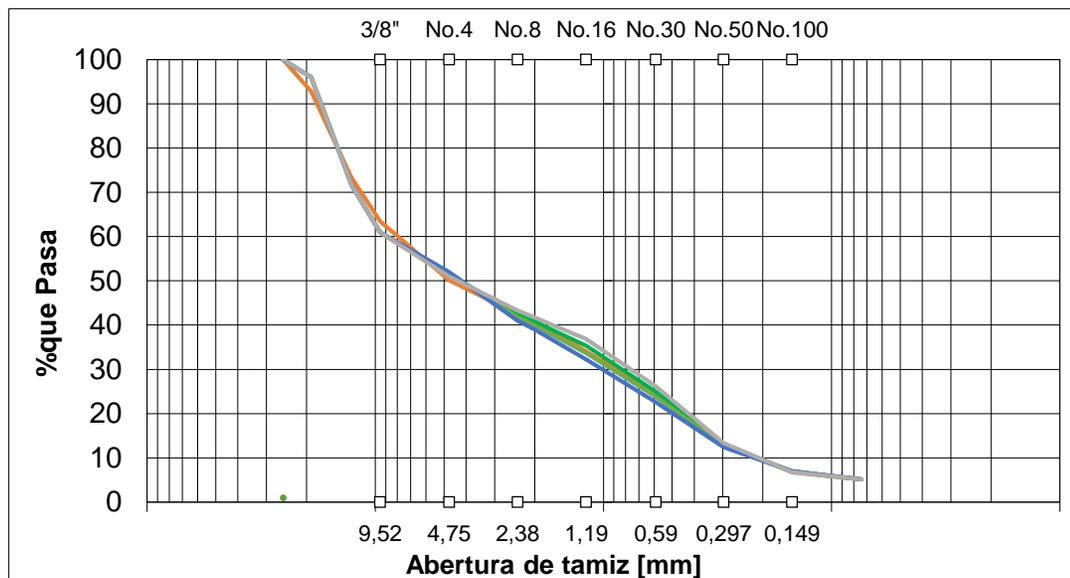
Granulometría

Como se puede observar, la distribución granulométrica del agregado fino (arena) con la incorporación de residuos de vidrio molido, no es afectada de gran manera cuando el vidrio es incorporado en porcentajes reducidos, puesto que mientras más vidrio es incorporado a la arena éste tiende a generar una curva con más porcentaje de finos.

Tabla 69: Comparación de granulometría de la arena con incorporación de diferentes porcentajes de vidrio molido

Tamices	sin vidrio	5% vidrio	10,0% vidrio	15,0% vidrio	20,0% vidrio
	% que pasa del total				
3/8"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Nº 4	93,18	93,29	94,49	90,76	90,60
Nº 8	79,68	77,31	73,47	66,18	66,24
Nº 10	76,65	74,45	69,22	61,89	61,20
Nº 16	68,05	64,78	60,11	53,51	49,16
Nº 30	45,69	45,64	44,24	39,02	30,75
Nº 50	17,47	20,67	20,09	18,56	10,22
Nº 100	3,55	4,89	5,27	5,78	2,20
Nº 200	0,39	0,82	1,31	1,51	0,44
Base	0,19	0,29	0,24	0,33	0,22

Figura 50: Curva granulométrica de arena con incorporación de diferentes porcentajes de vidrio molido



Fuente: Elaboración propia

Peso específico

Otro aspecto a tomar en cuenta para el diseño de mezclas asfálticas es el peso específico que presentan los agregados, puesto que un peso específico elevado dotará mejores propiedades a la mezcla.

En cuanto al peso específico determinado para el residuo a ser incorporado en la mezcla se observa que presenta un valor por debajo a comparación del peso específico de la arena, ambos valores no se encuentran muy alejados lo que hace pensar que la utilización de este material podría ser incorporado con facilidad dentro de una mezcla asfáltica.

Además, según la tabla 61 se puede verificar el comportamiento del peso específico con la incorporación del residuo, donde se refleja que a manera que el porcentaje de vidrio molido crece en remplazo de la arena, el peso específico va decreciendo. Así mismo, se puede observar que los residuos de vidrio molido presentan un porcentaje de absorción demasiado baja, y que cuando es incorporado en la arena su porcentaje de absorción igualmente decrece, lo cual resulta beneficioso en construcción.

Tabla 70: Peso específico y absorción de arena con diferentes porcentajes de vidrio molido

Muestra	Peso específico seco (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	Peso esp. bruto sat. sup. Seco (gr/cm ³)	% de absorción
Arena	2,456	2,544	2,491	1,404
Vidrio molido	2,316	2,325	2,320	0,168
Arena + 5% vidrio	2,456	2,539	2,489	1,332
Arena + 10% vidrio	2,449	2,528	2,480	1,283
Arena + 15% vidrio	2,421	2,492	2,449	1,175
Arena + 20% vidrio	2,359	2,421	2,385	1,080

Fuente: Elaboración propia

Durabilidad por sulfato de sodio

Los sulfatos representan uno de los mayores riesgos de agresión química para el cualquier material de construcción, las normas establecidas permiten una pérdida de peso máximo de 12%.

Según los resultados que se alcanzaron se aprecia que el vidrio molido presenta una pérdida de peso muy reducida luego de entrar a contacto con el sulfato, es decir, es un material muy resistente a agresiones químicas por sulfatos en comparación a la arena. Además, se puede considerar que cuando el vidrio es incorporado a la arena y es sometido a estos ataques, la pérdida de peso que se genera es menor.

Tabla 71: Durabilidad por sulfatos de arena con diferentes porcentajes de vidrio molido

Muestra	Arena	Vidrio	Arena + 10% vidrio	Arena + 15% vidrio	Máximo normativa
Pérdida de peso	5,91 %	0,81%	5,45%	4,98%	12,00

Fuente: Elaboración propia

Equivalente de arena

Con el equivalente de arena se evalúa la limpieza y plasticidad de los agregados finos. La normativa establece que valores por encima del 50% reflejan un grado de limpieza suficiente para la mayor parte de las aplicaciones. En el caso del vidrio molido presenta un valor de equivalente de arena menor comparado a la arena, empero no se encuentra fuera del rango establecido, lo cual no refleja una preocupación al momento de ser aplicado en los ensayos de mezclas asfálticas.

Tabla 72: Equivalente de arena con diferentes porcentajes de vidrio molido

Muestra	Arena	Vidrio	Arena + 5% vidrio	Arena + 10% vidrio	Arena + 15% vidrio	Arena + 20% vidrio
Equivalente	91,7 %	86,8 %	91.4 %	90,3 %	88,5%	88,1

Fuente: Elaboración propia

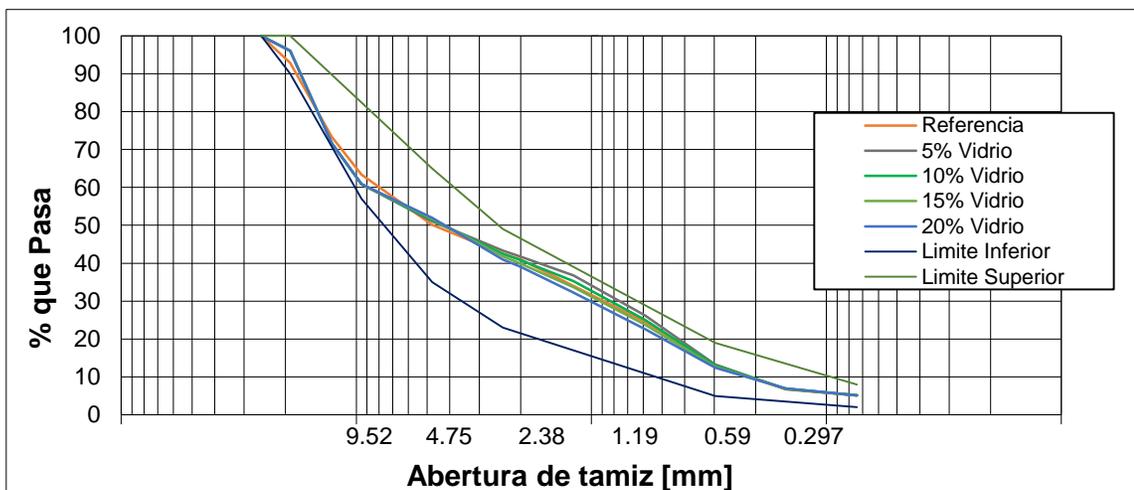
3.6.2. Comparación de las mezclas de trabajo

A continuación se lleva a cabo un resumen con los valores obtenidos en las diferentes fórmulas de trabajo diseñadas. Además, se llevará a cabo una comparación de las mezclas con la adición de residuos de vidrio molido en relación a la mezcla de referencia.

Las granulometrías seleccionadas para cada una de las fórmulas de trabajo diseñadas fueron:

Tabla 73: Encaje granulométrico de mezclas estudiadas

Tamices	Abertura (mm)	Referencia	5,0% vidrio	10,0% vidrio	15,0% vidrio	20,0% vidrio
		% que pasa del total				
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
¾"	19,1	92,80	96,00	96,00	96,00	96,00
½"	12,7	73,30	71,60	71,60	71,60	71,60
3/8"	9,5	63,40	60,90	60,90	60,90	60,90
Nº 4	4,75	50,10	51,00	51,40	51,70	52,00
Nº 8	2,38	42,50	43,30	42,50	41,80	41,00
Nº 10	2,00	41,00	41,70	40,80	39,90	39,00
Nº 16	1,19	34,00	36,80	35,30	33,70	32,20
Nº 30	0,59	24,50	26,20	25,00	23,80	22,60
Nº 50	0,297	13,20	13,30	13,00	12,70	12,40
Nº 100	0,149	6,70	6,80	6,90	6,90	7,00
Nº 200	0,074	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10



Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar, en encaje realizado es bastante similar en todas las fórmulas de trabajo estudiadas. Este encaje esta realizado lo más centrado posible en el huso con el objetivo de prevenir que pequeñas variaciones de la granulometría durante la fabricación impidan que el esqueleto granulométrico siga cumpliendo con las especificaciones. Además, destacar que todas las granulometrías presentadas cumplen con la condición de encontrarse dentro los límites superior e inferior establecidos por normativa.

En cuanto a los resultados obtenidos luego del diseño de las mezclas asfálticas por el método Marshall, la siguiente tabla muestra un resumen de los valores de cada propiedad estudiada en las fórmulas de trabajo.

Tabla 74: Resumen de valores obtenidos en las mezclas estudiadas

Densidad de las mezclas asfálticas diseñadas (gr/cm³)					
Variación de cemento asfáltico	Mezcla de referencia	5% de vidrio	10% de vidrio	15% de vidrio	20% de vidrio
4.0%	2.283	2.281	2.277	2.245	2.259
4.5%	2.313	2.310	2.304	2.285	2.290
5.0%	2.327	2.326	2.322	2.298	2.312
5.5%	2.339	2.333	2.325	2.291	2.309
6.0%	2.332	2.320	2.311	2.279	2.294
% óptimo de C.A.	5.10	5.06	5.04	4.98	5.01
Densidad (gr/cm ³)	2.332	2.329	2.322	2.298	2.309

Estabilidad de las mezclas asfálticas diseñadas (Lb.)					
Variación de cemento asfáltico	Mezcla de referencia	5% de vidrio	10% de vidrio	15% de vidrio	20% de vidrio
4.0%	1612.9	1677.3	1825.7	1600.2	1134.9
4.5%	1992.1	2059.4	2187.2	1892.4	1482.7

5.0%	2285.0	2328.5	2415.2	1972.3	1578.5
5.5%	2251.8	2352.6	2327.1	1824.5	1391.4
6.0%	2070.7	2130.3	2063.6	1548.5	1152.1
% óptimo de C.A.	5.10	5.06	5.04	4.98	5.01
Estabilidad (lb)	2269	2340	2392	1963	1556
> 1800 lb.	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	No cumple

Vacíos totales de las mezclas asfálticas diseñadas (%)

Variación de cemento asfáltico	Mezcla de referencia	5% de vidrio	10% de vidrio	15% de vidrio	20% de vidrio
4.0%	7.37	7.06	7.02	7.70	7.93
4.5%	5.47	5.15	5.31	5.34	5.97
5.0%	4.17	4.20	4.46	4.13	4.39
5.5%	2.98	3.29	3.60	3.71	3.81
6.0%	2.56	2.65	3.01	3.55	3.72
% óptimo de C.A.	5.10	5.06	5.04	4.98	5.01
Vacíos totales (%)	3.83	3.89	4.28	4.20	4.46
3% – 5%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Vacíos en agregado mineral - VAM de las mezclas asfálticas diseñadas (%)

Variación de cemento asfáltico	Mezcla de referencia	5% de vidrio	10% de vidrio	15% de vidrio	20% de vidrio
4.0%	16.41	16.08	16.52	16.59	16.87
4.5%	15.77	15.73	15.98	15.51	16.16
5.0%	15.68	15.70	15.87	15.50	15.82
5.5%	15.70	15.98	16.29	16.18	16.37
6.0%	16.40	16.41	16.71	17.07	17.33
% óptimo de C.A.	5.10	5.06	5.04	4.98	5.01

VAM (%)	15.60	15.69	15.88	15.50	15.91
> 15%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Relación betún vacíos - RBV de las mezclas asfálticas diseñadas (%)					
Variación de cemento asfáltico	Mezcla de referencia	5% de vidrio	10% de vidrio	15% de vidrio	20% de vidrio
4.0%	55.06	54.10	52.51	53.55	52.99
4.5%	65.29	65.63	65.08	65.58	63.07
5.0%	72.42	73.16	72.21	73.34	72.25
5.5%	80.04	78.98	77.50	77.05	76.72
6.0%	84.30	83.89	82.11	79.22	78.55
% óptimo de C.A.	5.10	5.06	5.04	4.98	5.01
RBV (%)	74.96	74.47	72.99	72.83	71.89
65% - 75%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

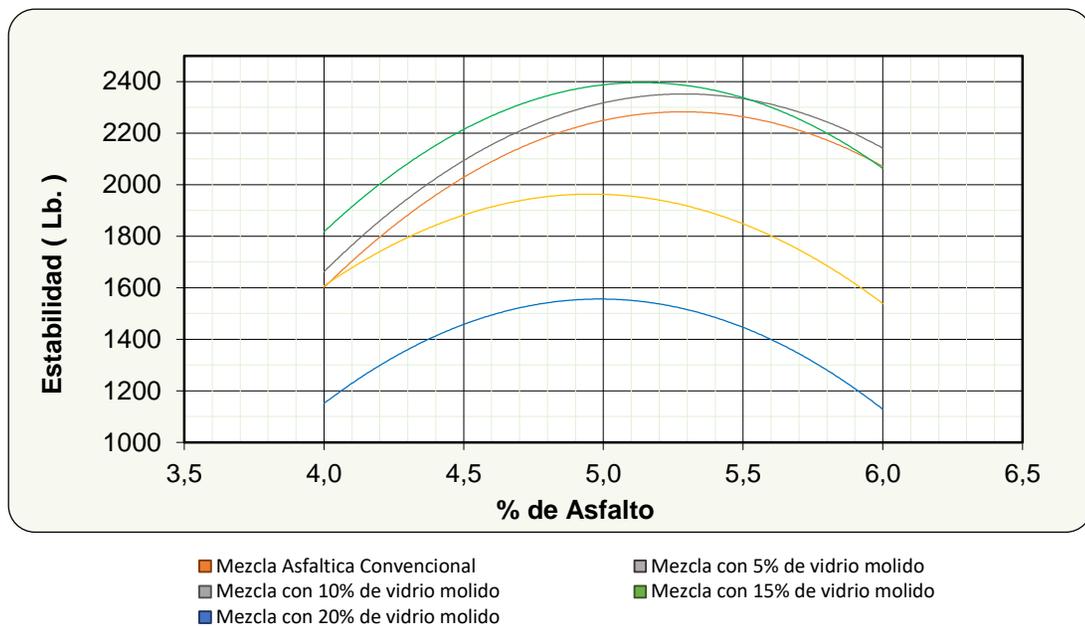
Fluencia de las mezclas asfálticas diseñadas (1/100")					
Variación de cemento asfáltico	Mezcla de referencia	5% de vidrio	10% de vidrio	15% de vidrio	20% de vidrio
4.0%	8.00	8.00	8.67	8.33	8.33
4.5%	9.33	9.00	9.67	9.67	9.33
5.0%	10.33	10.67	11.00	11.00	11.00
5.5%	12.67	13.67	14.33	13.33	12.67
6.0%	15.33	15.67	17.33	16.00	16.00
% óptimo de C. asfáltico	5.10	5.06	5.04	4.98	5.01
Fluencia (1/100")	10.94	11.24	11.57	11.05	10.83
8 – 14 (1/100")	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Fuente: Elaboración propia

A continuación se procederá a realizar la comparación de cada una de las propiedades de las mezclas asfálticas diseñadas en relación con la mezcla asfáltica de referencia (convencional) de manera que se pueda analizar el comportamiento de cada fórmula de trabajo propuesta en la investigación.

Estabilidad Marshall

Figura 51: Curva de estabilidad para las mezclas de trabajo

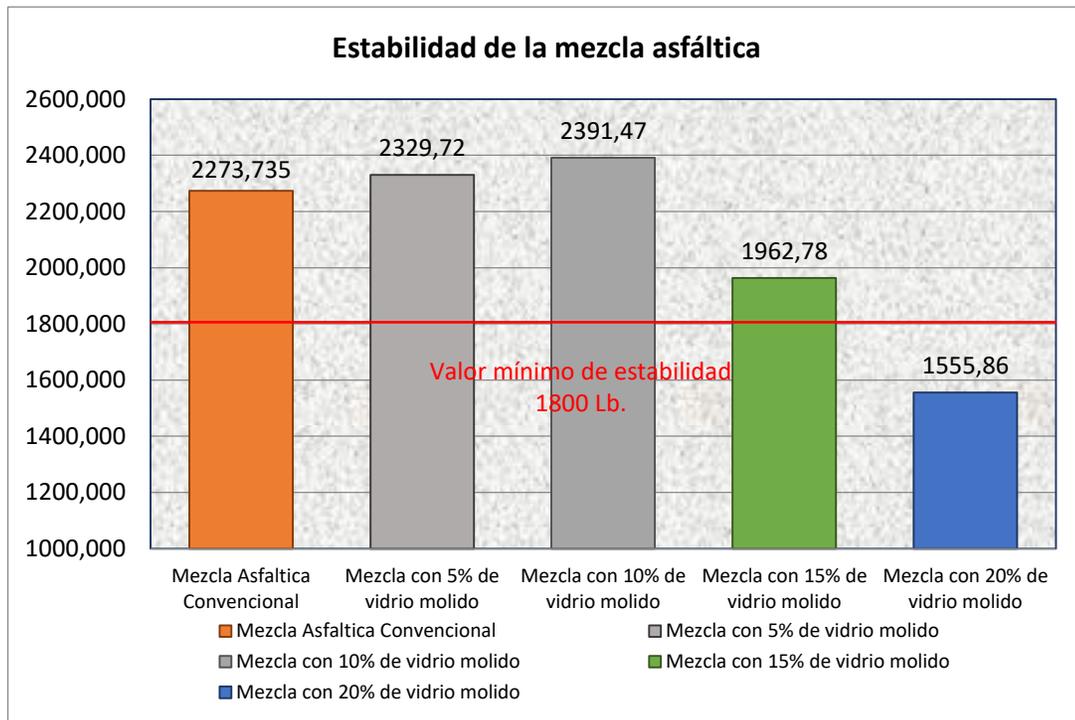


Fuente: Elaboración propia

La estabilidad es la capacidad de una mezcla asfáltica de resistir la acción del desplazamiento y deformación bajo las cargas impuestas. Para las mezclas ensayadas se puede apreciar en la figura que todas siguen un mismo comportamiento, semejante a la mezcla asfáltica de referencia.

El valor de la estabilidad aumenta al aumentar el contenido de asfalto hasta un punto máximo, a partir del cual la estabilidad decrece. Además se puede notar, que las mezclas que contienen porcentajes de 5% y 10% de vidrio molido presentan valores de estabilidad mayores que la mezcla de referencia; por otro lado las mezclas que contienen 15% y 20% de vidrio molido presentan valores menores de estabilidad.

Figura 52: Comparación de estabilidad para las mezclas de trabajo con porcentaje de asfalto óptimo



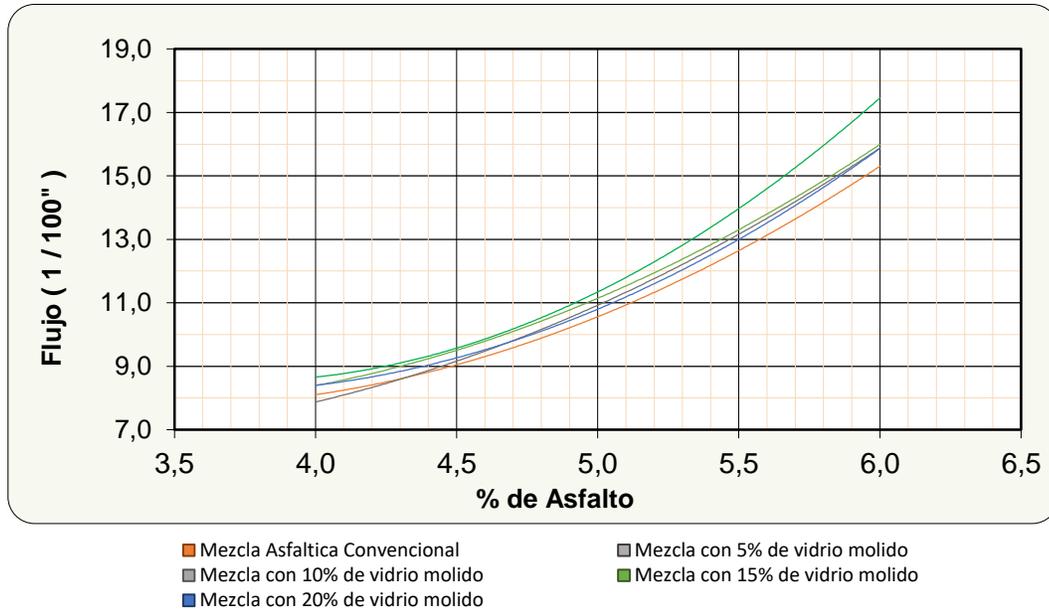
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados de estabilidad Marshall para los porcentajes óptimos de las mezclas estudiadas se puede apreciar que las muestras que contienen 5%, 10% y 15% de vidrio molido, además de la muestra convencional, superan el límite establecido por norma, la cual indica que para un tráfico pesado a la que será expuesta la mezcla asfáltica debe adquirir un valor superior a 1800 lb.

Cabe destacar, según los resultados, que si se añade residuos de vidrio molido en porcentajes comprendidos entre 5% a 10% para una mezcla asfáltica, ésta presentará mayor estabilidad en comparación a mezclas asfálticas convencionales, puesto que a partir de la incorporación del 10% de vidrio molido la estabilidad empieza a decrecer. Si bien la muestra que contiene 15% de vidrio no figura fuera del límite establecido, representa una disminución considerable en la estabilidad.

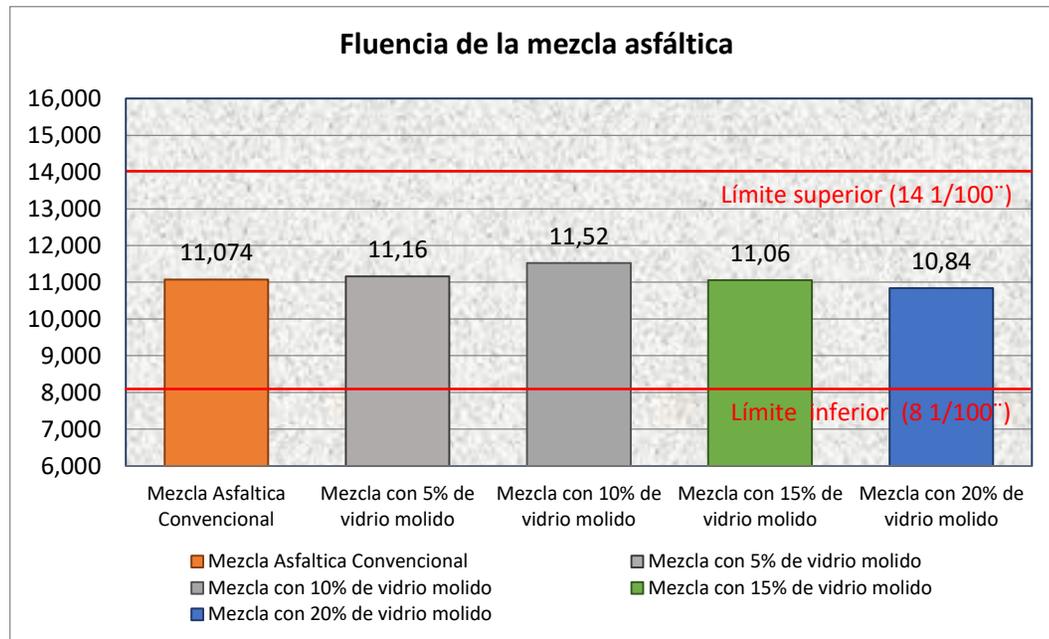
Flujo de las mezclas de trabajo

Figura 53: Comparación de flujo para las mezclas de trabajo



Fuente: Elaboración propia

Figura 54: Comparación de flujo para las mezclas asfálticas de trabajo con porcentaje de asfalto óptimo



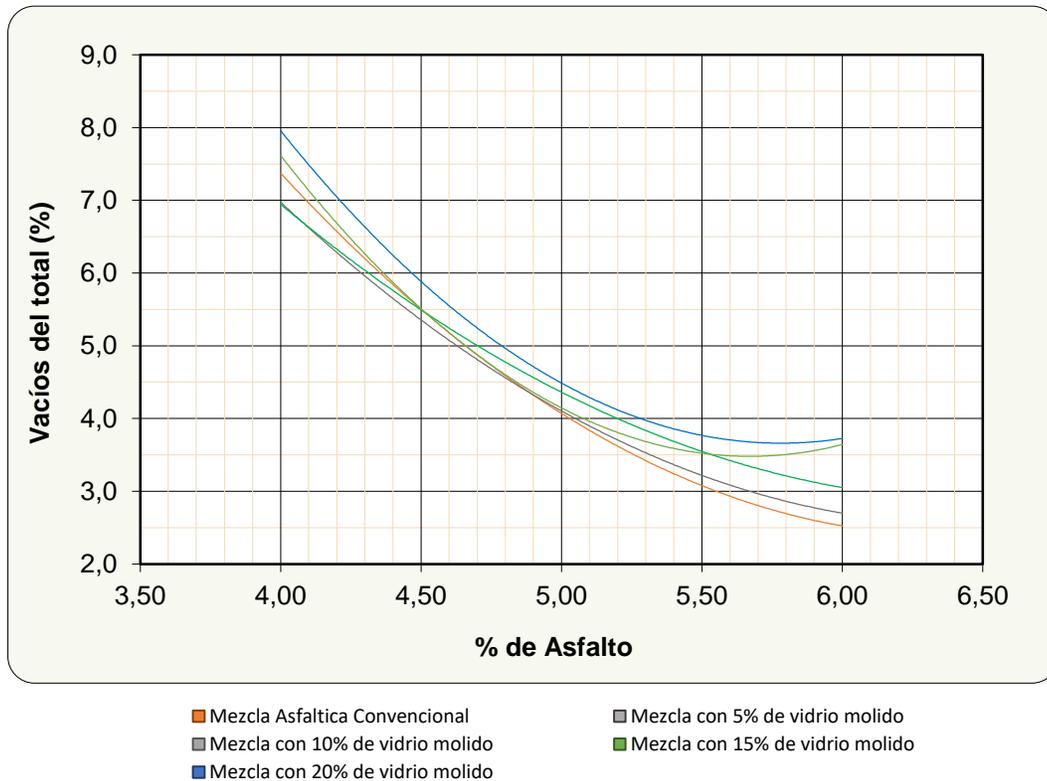
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, analizando el flujo que presenta en las mezclas asfálticas diseñadas, se puede notar que todas encuentran gran similitud en la curva generada, y con valores de flujo dentro del rango establecido por norma considerando el porcentaje óptimo de asfalto, la cual permite una variación comprendida entre 8 a 14 centésima de pulgada (1/100").

De igual forma se debe hacer notar que con la incorporación a escala de residuos de vidrio en la mezcla asfáltica, el flujo va creciendo, hasta la mezcla que contiene 10% de vidrio molido, posterior a esta mezcla de trabajo la fluencia empieza a decrecer levemente.

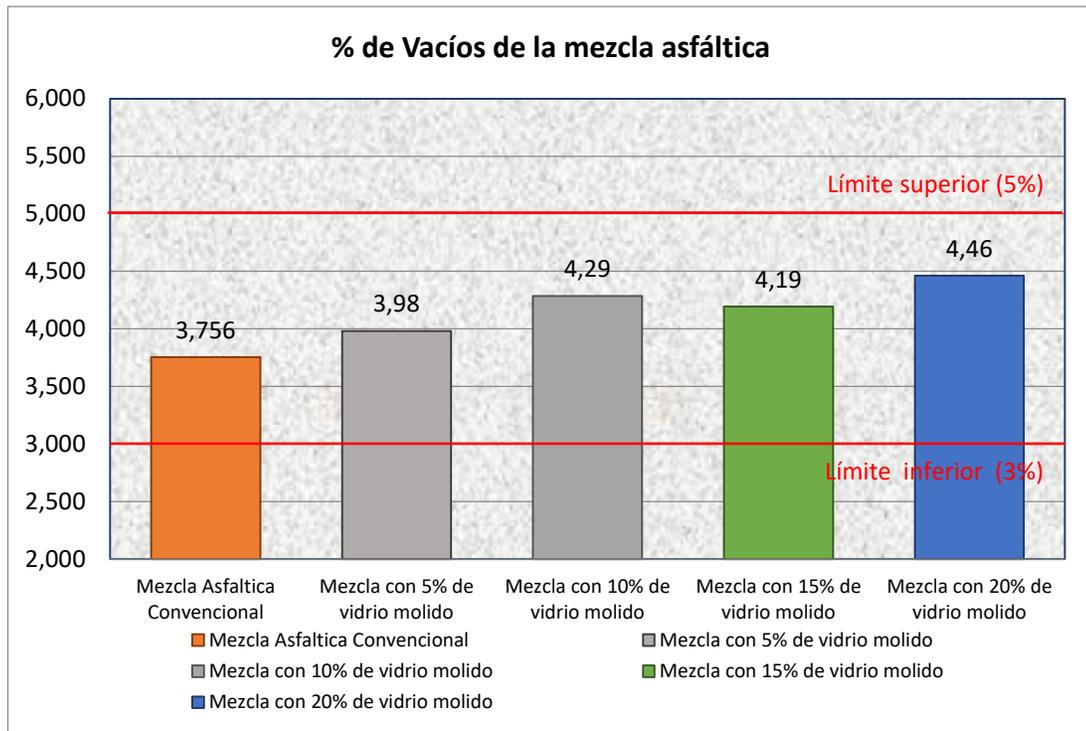
Porcentaje de vacíos totales de la mezcla

Figura 55: Comparación de porcentaje de vacíos para las mezclas de trabajo



Fuente: Elaboración propia

Figura 56: Comparación de vacíos totales para las mezclas de trabajo con porcentaje de asfalto óptimo



Fuente: Elaboración propia

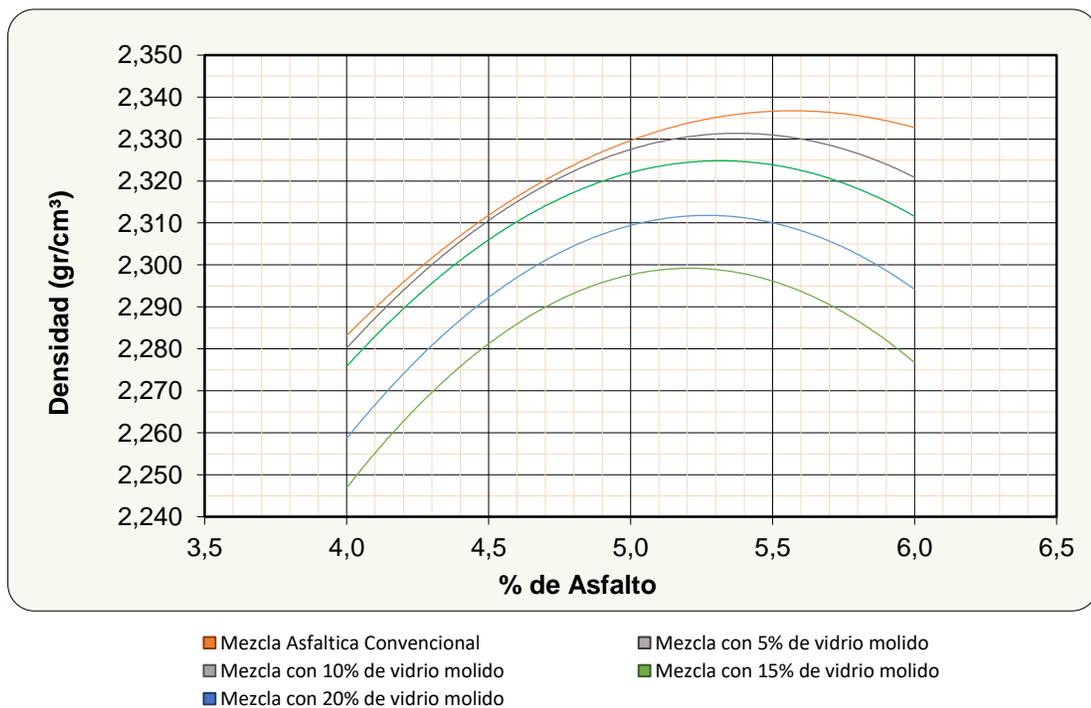
De acuerdo a los resultados obtenidos para el porcentaje de vacíos que presentan las mezclas asfálticas estudiadas (Figura 56), se puede notar un comportamiento similar en cuanto a la curva generada con referencia a la mezcla convencional, a excepción de la mezcla que contiene 15% de vidrio molido ya que la curva generada presenta una leve parábola mientras se aumenta el porcentaje de asfalto. Por otro lado se observa que porcentajes de mezclas asfálticas con 5% y 15% de vidrio molido añadidos tienen una tendencia de acercamiento mayor hacia el porcentaje óptimo de vacíos para una mezcla asfáltica.

Además, analizando la figura 56 se observa que, para un porcentaje óptimo de cemento asfáltico, mientras se incorpora mayor cantidad de vidrio molido como sustituto en porcentaje de la arena a las muestras, éstas presentan mayor cantidad de vacíos. Lo dicho se puede dar por diferentes factores, como la diferencia de peso específico entre agregados, la granulometría de diseño y el tratamiento que se produce al momento de la compactación en el diseño Marshall, ya que conforme se aumenta el contenido de residuos de vidrio molido tiende a dificultarse la compactación en las partículas de vidrio más grandes.

Así mismo, cabe destacar que todas las muestras de ensayo se encuentran dentro el rango especificado por norma, el cual está comprendido entre 3% a 5% de vacíos en mezclas.

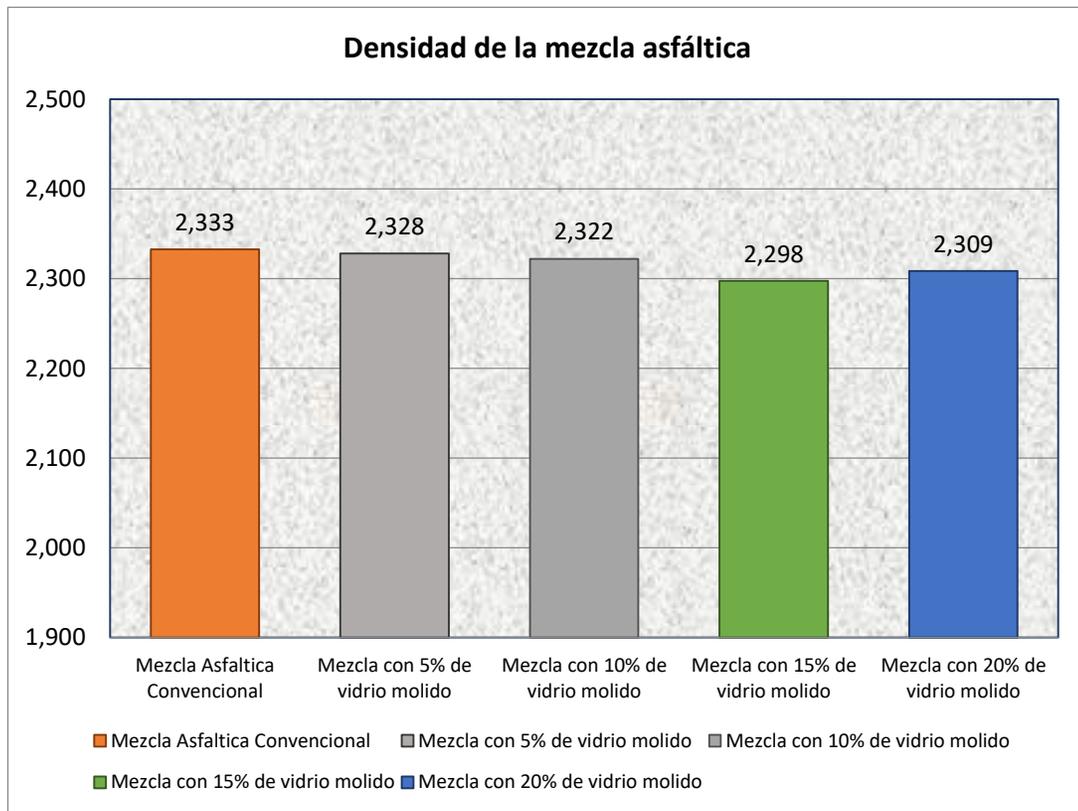
Densidad de las mezclas de trabajo

Figura 57: Comparación de densidad para las mezclas de trabajo



Fuente: Elaboración propia

Figura 58: Comparación de densidad para las mezclas de trabajo con porcentaje de asfalto óptimo



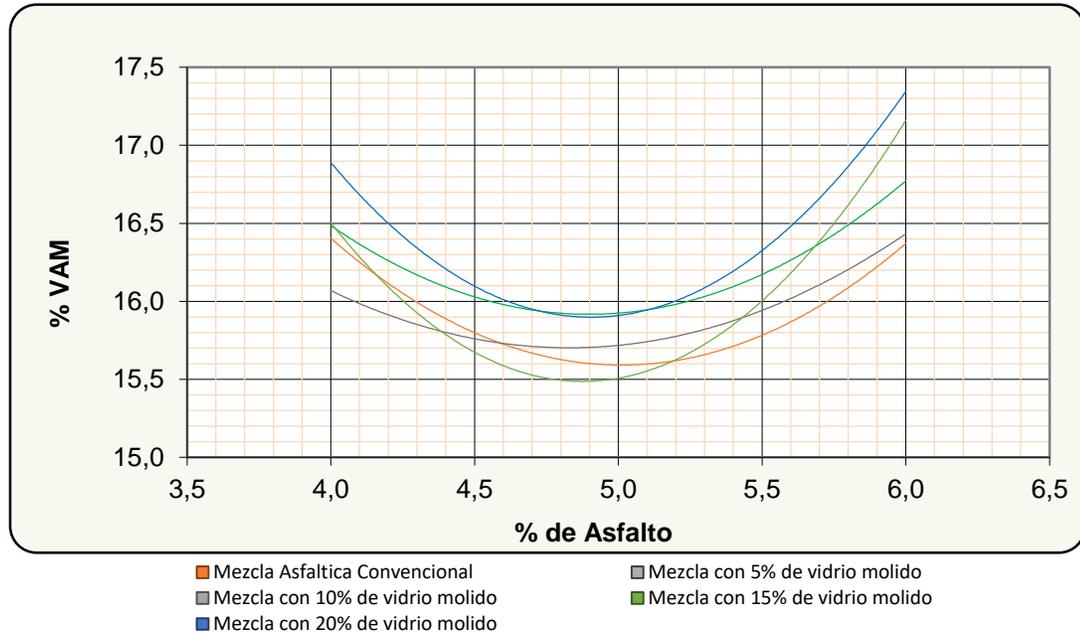
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las densidades, el comportamiento de las curvas para cada mezcla y los valores que presentan para un contenido óptimo de asfalto son muy similares, debido a la semejanza que los materiales presentan en cuanto a su peso específico.

Además, se puede notar un leve decrecimiento de las densidades para aquellas muestras que contienen mayores porcentajes de vidrio molido, esto debido a que la densidad del residuo incorporado es menor al de los agregados naturales, lo cual repercute en la densidad de las muestras ensayadas.

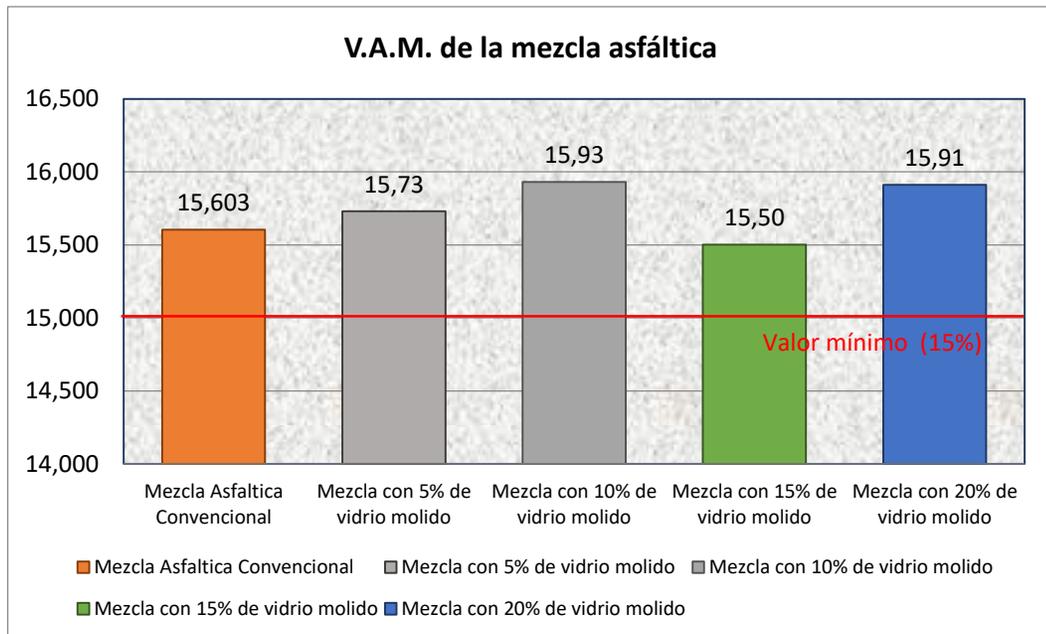
Vacíos en agregado mineral – VAM

Figura 59: Comparación de vacíos en agregado mineral para las mezclas de trabajo



Fuente: Elaboración propia

Figura 60: Comparación de vacíos en agregado mineral para las mezclas de trabajo con porcentaje de asfalto óptimo



Fuente: Elaboración propia

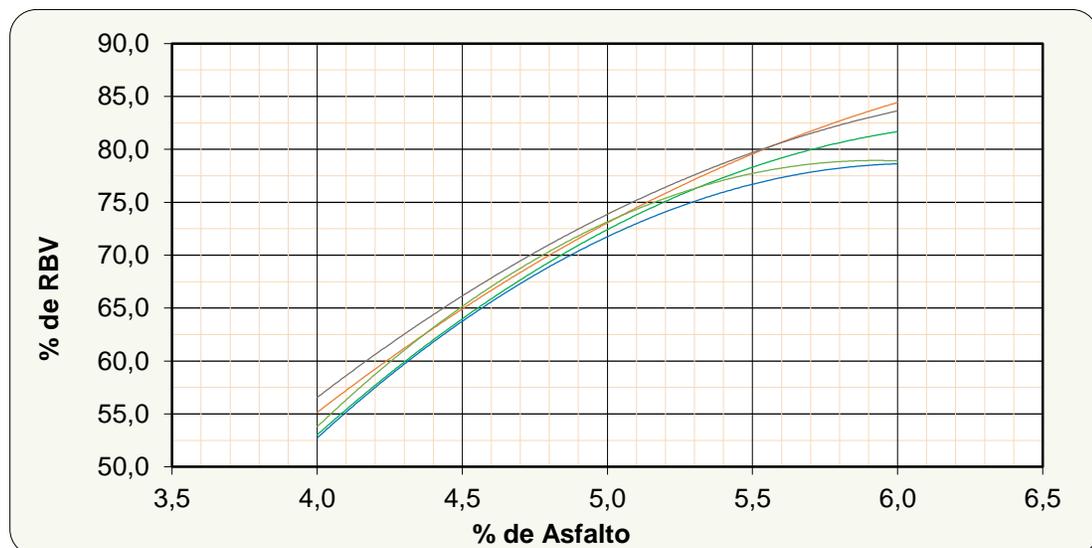
El VAM son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto en una mezcla asfáltica compactada de pavimentación.

Si se observa la figura 59, nuevamente la mezcla que contiene 15% de vidrio molido genera una curva ligeramente diferente a las demás presenta una curva más parabólica, al igual que la mezcla con 20% de vidrio, en comparación de las otras mezclas cuya tendencia es una parábola más plana; lo cual indica una mejor estabilidad en cuanto a la variación del porcentaje de cemento asfáltico y los vacíos en el agregado mineral que se generan.

En la figura 60 se puede apreciar que existe una tendencia de crecimiento en el porcentaje de vacíos en el agregado mineral. Lo dicho anteriormente se puede dar a consecuencia de la dificultad que existe al momento de compactar las muestras mientras el porcentaje de vidrio molido incluido se incrementa. Así mismo, resaltar que todas las muestras ensayadas superan el límite inferior establecido (15% de VAM) en la tabla 6 de la presente investigación.

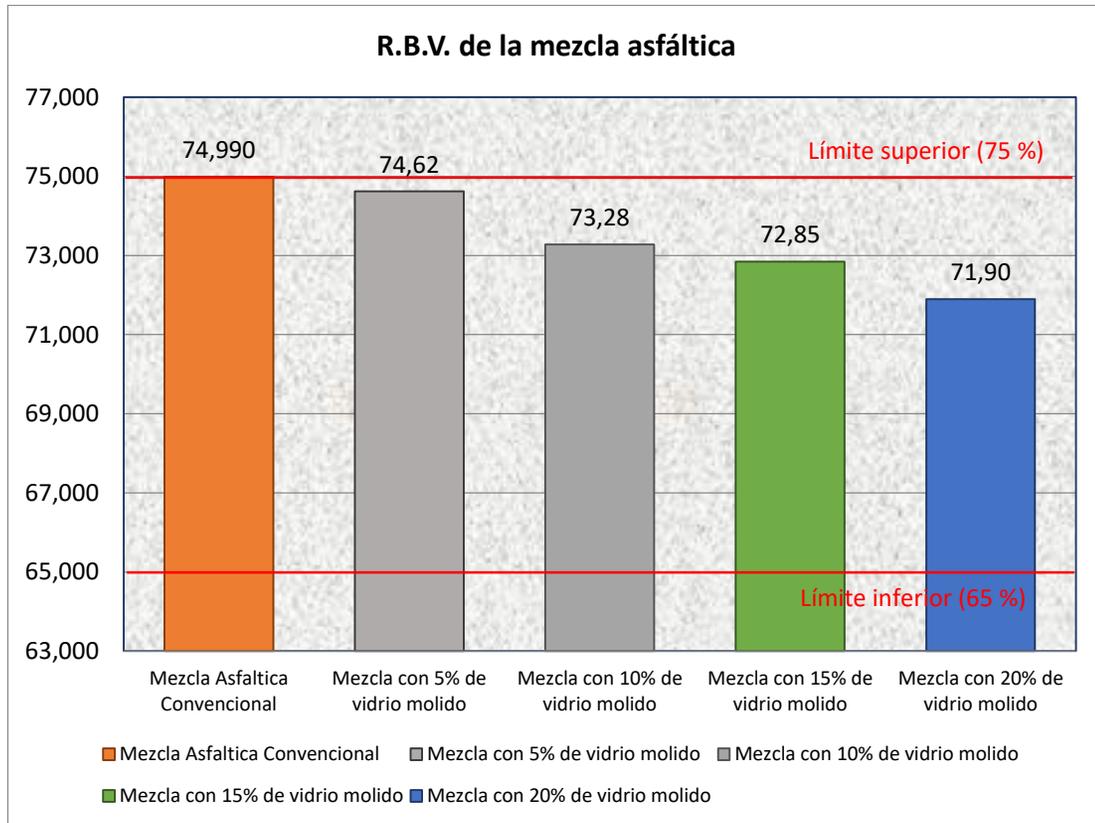
Relación betún vacíos – RBV

Figura 61: Comparación de vacíos en agregado mineral para las mezclas de trabajo



Fuente: Elaboración propia

Figura 62: Comparación de relación betún vacíos para las mezclas de trabajo con porcentaje de asfalto óptimo

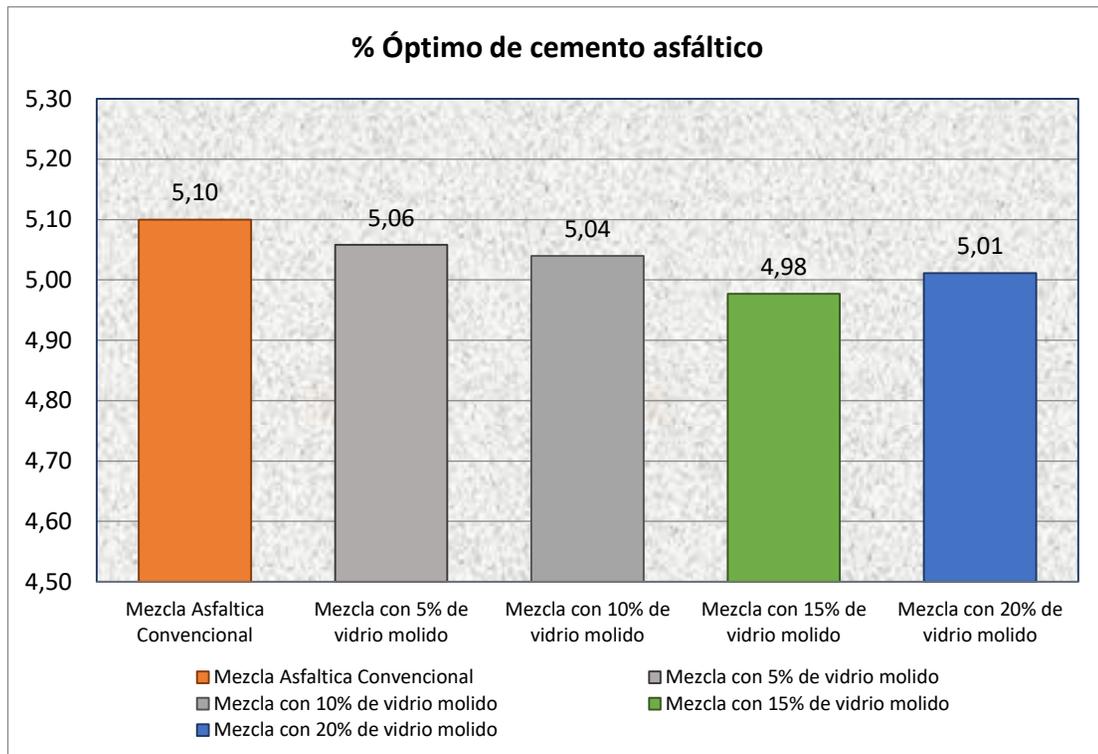


En cuanto a la relación betún vacíos se observa que la tendencia de las curvas (Figura 61) son idénticas y muy cercanas entre las muestras estudiadas, lo cual representa un comportamiento similar a la mezcla de referencia.

Observando además, la relación existente del porcentaje de RBV para los contenidos óptimos de cada muestra, existe una reducción de los mismos a manera que el porcentaje de vidrio se incrementa, lo cual podría significar que existe mayor cantidad de aire en las mezclas con vidrio molido.

Porcentaje óptimo de asfalto

Figura 63: Comparación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico para las mezclas de trabajo



Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede apreciar una gran similitud en cuanto al contenido óptimo de cemento asfáltico.

Por otro lado se evidencia que el contenido de asfalto óptimo disminuye a medida que el residuo de vidrio molido es incorporado en las mezclas asfálticas, esto podría ayudar de gran manera en el ahorro de materiales y costos en la construcción, puesto que se requerirá menor cantidad de asfalto para la construcción de carreteras.

3.6.3. Análisis de costos

Luego de realizar la comparación de las propiedades de las mezclas de trabajo diseñadas se puede resaltar que, según los datos obtenidos, la utilización del vidrio molido presenta gran validez para su aceptación aquellos porcentajes que se encuentran comprendidos entre el 5% a 15%, siendo el 10% el porcentaje óptimo de vidrio molido a ser añadida en una mezcla asfáltica.

Tomando en cuenta lo mencionado, por consiguiente se realizará el análisis de presupuesto para una mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica con la incorporación del 10% de vidrio molido, de manera que se pueda evidenciar la factibilidad de la reutilización de este residuo como agregado fino en la construcción de carreteras, mediante una comparación entre ambos casos.

Debido a que en nuestro medio no se puede encontrar vidrio molido en grandes cantidades se recurrió a realizar la cotización en el interior del país, considerando el costo del proceso de producción y transporte. El análisis de costos para ambas fórmulas de trabajo se encuentra desarrollado en las tablas posteriores.

Inmediatamente de realizar la comparación de precios unitarios (Tabla 75 y 76) se puede verificar la variación económica que representa la utilización de vidrio molido como agregado fino, puesto que los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Mezcla asfáltica convencional: Costo Bs. 1340.21 /m³ - Bs. 656,701.50 /km

Mezcla con 10% de vidrio molido Costo Bs. 1342.21 /m³ - Bs. 657,683.03 /km

La producción de mezclas asfálticas con incorporación del 10% de vidrio molido representa un incremento de Bs 2.00/ m³ o de Bs. 981.53/ km, en relación a mezclas asfálticas convencionales. Si bien, la diferencia de costos representa un incremento significativo, se debe tener en cuenta que se consideró la obtención del vidrio molido en el interior del país, lo que provoca un incremento en su costo; asimismo cabe recalcar que al usar le vidrio molido como agregado fino en mezclas asfálticas se mejora considerablemente las propiedades de la mezcla, además de crear carreteras sustentables.

Tabla 75: Análisis de precio unitario – mezcla asfáltica convencional

DATOS GENERALES:					
Actividad:	Carpeta de concreto asfáltico convencional				
Unidad:	m ³				
Moneda:	Bs.				
1. MATERIALES					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Grava triturada clasificada	m ³	0,46	152	69,24
2	Arena clasificada	m ³	0,45	145	64,67
3	Cemento Portland	kg	55,00	1,1	60,50
4	Cemento asfáltico	Lt	51,00	10,58	539,58
5	Diesel	Lt	18,00	3,74	67,32
TOTAL MATERIALES					801,31
2.MANO DE OBRA					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Operador de planta	Hra.	0,0900	23,19	2,0871
2	Obrero A	Hra.	0,0720	12,07	0,86904
3	Chofer	Hra.	0,0012	18	0,0216
4	Ayudante de operador	Hra.	0,0280	16	0,448
5	Operador de equipo liviano	Hra.	0,0820	18	1,476
6	Operador A	Hra.	0,8200	20	16,4
7	Operador B	Hra.	0,8200	20	16,4
SUBTOTAL MANO DE OBRA					37,70174
Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%)				71,18	26,84
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	9,64
TOTAL MANO DE OBRA					74,18
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Planta de calentamiento de asfalto	Hra.	0,09	965,23	86,8707
2	Cargador frontal de ruedas >= 950 m ³	Hra.	0,0001	421,29	0,042129
3	Volqueta >= 12 m ³	Hra.	0,0012	227,87	0,273444
4	Distribuidor de agregados Autop.	Hra.	0,028	455,03	12,74084
5	Escoba mecánica Autop.	Hra.	0,028	71,55	2,0034
6	Compactador Rod. Liso	Hra.	0,035	303,85	10,63475
7	Rodillo neumático TSP 10000	Hra.	0,084	332,81	27,95604
Herramientas =(% del total de mano de obra)				5,00	3,71
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					144,23
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
Gastos generales = % de 1+2+3				15,90	162,13
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					162,13
5. UTILIDAD					
Utilidad= % de 1+2+3+4				10,00	118,19
COSTO TOTAL UTILIDAD					118,19
6. IMPUESTOS					
Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5				3,09	40,17
COSTO TOTAL IMPUESTOS					40,17
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)					1340,21

DATOS GENERALES:					
Actividad:	Carpeta de concreto asfáltico convencional				
Unidad:	km				
Moneda:	Bs.				
1. MATERIALES					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Grava triturada clasificada	m³	223,20	152	33925,64
2	Arena clasificada	m³	218,54	145	31688,30
3	Cemento Portland	kg	26950,00	1,1	29645,00
4	Cemento asfáltico	Lt	24990,00	10,58	264394,20
5	Diesel	Lt	8820,00	3,74	32986,80
TOTAL MATERIALES					392639,94
2.MANO DE OBRA					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Operador de planta	Hra.	44,1000	23,19	1022,679
2	Obrero A	Hra.	35,2800	12,07	425,8296
3	Chofer	Hra.	0,5880	18	10,584
4	Ayudante de operador	Hra.	13,7200	16	219,52
5	Operador de equipo liviano	Hra.	40,1800	18	723,24
6	Operador A	Hra.	401,8000	20	8036
7	Operador B	Hra.	401,8000	20	8036
SUBTOTAL MANO DE OBRA					18473,8526
Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%)				71,18	13149,69
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	4724,56
TOTAL MANO DE OBRA					36348,10
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Planta de calentamiento de asfalto	Hra.	44,1	965,23	42566,643
2	Cargador frontal de ruedas >= 950 m³	Hra.	0,049	421,29	20,64321
3	Volqueta >= 12 m³	Hra.	0,588	227,87	133,98756
4	Distribuidor de agregados Autop.	Hra.	13,72	455,03	6243,0116
5	Escoba mecánica Autop.	Hra.	13,72	71,55	981,666
6	Compactador Rod. Liso	Hra.	17,15	303,85	5211,0275
7	Rodillo neumático TSP 10000	Hra.	41,16	332,81	13698,4596
Herramientas =(% del total de mano de obra)				5,00	1817,40
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					70672,84
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
Gastos generales = % de 1+2+3				15,90	79446,08
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					79446,08
5. UTILIDAD					
Utilidad= % de 1+2+3+4				10,00	57910,70
COSTO TOTAL UTILIDAD					57910,70
6. IMPUESTOS					
Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5				3,09	19683,85
COSTO TOTAL IMPUESTOS					19683,85
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)					656701,50

Tabla 76: Análisis de precio unitario – mezcla asfáltica con 10% de vidrio molido

DATOS GENERALES:					
Actividad:	Carpeta de concreto asfáltico modificado (10% de vidrio molido)				
Unidad:	m³				
Moneda:	Bs.				
1. MATERIALES					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Grava triturada clasificada	m ³	0,46	152	69,28
2	Arena clasificada	m ³	0,35	145	50,94
3	Vidrio molido	m ³	0,10	205,00	20,50
4	Cemento asfáltico	Lt	50,50	10,58	534,29
5	Cemento Portland	kg	55,00	1,1	60,50
6	Diesel	Lt	18,00	3,74	67,32
TOTAL MATERIALES					802,83
2. MANO DE OBRA					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Operador de planta	Hra.	0,0900	23,19	2,0871
2	Obrero A	Hra.	0,0720	12,07	0,86904
3	Chofer	Hra.	0,0012	18	0,0216
4	Ayudante de operador	Hra.	0,0280	16	0,448
5	Operador de equipo liviano	Hra.	0,0820	18	1,476
6	Operador A	Hra.	0,8200	20	16,4
7	Operador B	Hra.	0,8200	20	16,4
SUBTOTAL MANO DE OBRA					37,70174
Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%)				71,18	26,84
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	9,64
TOTAL MANO DE OBRA					74,18
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Planta de calentamiento de asfalto	Hra.	0,09	965,23	86,8707
2	Cargador frontal de ruedas >= 950 m ³	Hra.	0,0001	421,29	0,042129
3	Volqueta >= 12 m ³	Hra.	0,0012	227,87	0,273444
4	Distribuidor de agregados Autop.	Hra.	0,028	455,03	12,74084
5	Escoba mecánica Autop.	Hra.	0,028	71,55	2,0034
6	Compactador Rod. Liso	Hra.	0,035	303,85	10,63475
7	Rodillo neumático TSP 10000	Hra.	0,084	332,81	27,95604
Herramientas =(% del total de mano de obra)				5,00	3,71
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					144,23
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
Gastos generales = % de 1+2+3				15,90	162,38
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					162,38
5. UTILIDAD					
Utilidad= % de 1+2+3+4				10,00	118,36
COSTO TOTAL UTILIDAD					118,36
6. IMPUESTOS					
Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5				3,09	40,23
COSTO TOTAL IMPUESTOS					40,23
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)					1342,21

DATOS GENERALES:					
Actividad:	Carpeta de concreto asfáltico modificado (10% de vidrio molido)				
Unidad:	km				
Moneda:	Bs.				
1. MATERIALES					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Grava triturada clasificada	m³	223,34	152	33947,98
2	Arena clasificada	m³	172,14	145	24959,87
3	Vidrio molido	m³	49,00	205,00	10045,00
4	Cemento asfáltico	Lt	24745,00	10,58	261802,10
5	Cemento Portland	kg	26950,00	1,1	29645,00
6	Diesel	Lt	8820,00	3,74	32986,80
TOTAL MATERIALES					393386,75
2.MANO DE OBRA					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Operador de planta	Hra.	44,1000	23,19	1022,679
2	Obrero A	Hra.	35,2800	12,07	425,8296
3	Chofer	Hra.	0,5880	18	10,584
4	Ayudante de operador	Hra.	13,7200	16	219,52
5	Operador de equipo liviano	Hra.	40,1800	18	723,24
6	Operador A	Hra.	401,8000	20	8036
7	Operador B	Hra.	401,8000	20	8036
SUBTOTAL MANO DE OBRA					18473,8526
Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%)				71,18	13149,69
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	4724,56
TOTAL MANO DE OBRA					36348,10
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Planta de calentamiento de asfalto	Hra.	44,1	965,23	42566,643
2	Cargador frontal de ruedas >= 950 m³	Hra.	0,049	421,29	20,64321
3	Volqueta >= 12 m³	Hra.	0,588	227,87	133,98756
4	Distribuidor de agregados Autop.	Hra.	13,72	455,03	6243,0116
5	Escoba mecánica Autop.	Hra.	13,72	71,55	981,666
6	Compactador Rod. Liso	Hra.	17,15	303,85	5211,0275
7	Rodillo neumático TSP 10000	Hra.	41,16	332,81	13698,4596
Herramientas =(% del total de mano de obra)				5,00	1817,40
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					70672,84
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
Gastos generales = % de 1+2+3				15,90	79564,82
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					79564,82
5. UTILIDAD					
Utilidad= % de 1+2+3+4				10,00	57997,25
COSTO TOTAL UTILIDAD					57997,25
6. IMPUESTOS					
Impuestos IT= % de 1+2+3+4+5				3,09	19713,27
COSTO TOTAL IMPUESTOS					19713,27
TOTAL PRECIO UNITARIO (1+2+3+4+5+6)					657683,03

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Posteriormente al estudio del conjunto de resultados obtenidos durante en la investigación, como conclusiones se citan las siguientes:

- Se pudo realizar la recolección de los agregados pétreos, grava y arena, en inmediaciones de la Secretaría de Obras y Servicios Públicos de la Alcaldía Municipal de Tarija, además del cemento asfáltico tipo 85/100, donde favorablemente dichos materiales se encuentran seleccionados para la conformación de mezclas asfálticas usadas en la construcción.
- Los desechos de vidrio fueron recogidos por diversos lugares de la ciudad, principalmente en canchas, plazas y calles que se encontraban alejadas del centro urbano. Cabe destacar que en su mayoría los desechos provenían de envases de botellas de vidrio de variado origen.
- El tamaño máximo de partículas de vidrio molido usado en la investigación fue de 4.75 mm, los cuales fueron obtenidos luego del proceso de molido manual según la metodología establecida.
- En cuanto a las características de los agregados, se realizaron los correspondientes ensayos de laboratorio prescritos en el “Manual de ensayos y materiales asfálticos” elaborado por la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.). El cómputo global de los resultados obtenidos en estos ensayos mostró características muy favorables cumpliendo así las especificaciones mínimas requeridas, propias de áridos naturales empleados en la construcción de carreteras. Los resultados fueron los siguientes:

Agregado grueso

- Desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (máx. 40%) = 27.63%
- Caras fracturadas en agregados gruesos (min. 75%) = 95.90%
- Método de sulfatos para determinar desintegración (máx. 12%) = 3.09%
- Adherencia agregado – ligante asfáltico (min. 95%) = 99.00%

Agregado fino

- Equivalente de arena (min. 45%) = 91.7%
- Método de sulfatos para determinar desintegración (máx. 12%) = 5.91%
- Adherencia agregado – ligante asfáltico (min. Grado 1) = Grado 8

- Así mismo, después de someter los residuos de vidrio al proceso de molido previo para reducirlos a un tamaño adecuado de aplicación, se realizaron los correspondientes ensayos de laboratorio propios del agregado fino, donde se verificó que las características que presenta cumple con las especificaciones mínimas requeridas para el diseño de mezclas asfálticas:

Vidrio molido

- Equivalente de arena (min. 45%) = 86.8%
- Método de sulfatos para determinar desintegración (máx. 12%) = 0.81%
- Adherencia agregado – ligante asfáltico (min. Grado 1) = Grado 7

A consecuencia de ello se pudo afirmar la gran similitud que presenta el vidrio molido con la arena, puesto que las propiedades de ambos son semejantes, principalmente en la densidad (arena = 2.544 gr/cm³, vidrio molido = 2.320 gr/cm³), así como la buena adhesividad que presentan con el ligante, además entre otros resultados, han de destacarse el buen comportamiento del residuo ante los ensayos de resistencia al desgaste por sulfatos (sulfato de sodio) y el equivalente de arena que presenta, cuyos valores superaron las exigencias establecidas por la normativa.

- Se analizó mediante los ensayos de laboratorio el comportamiento que presenta el agregado fino, luego de la incorporación de diferentes porcentajes de vidrio molido (5%, 10%, 15% y 20%), donde se contrastó que los resultados no varían considerablemente, además que se encuentran por muy encima de las especificaciones mínimas necesarias. Las características más importantes que se pudo observar es que, mientras mayor es el porcentaje de vidrio molido añadido al

agregado, el porcentaje de equivalente de arena disminuye levemente, se reduce el desgaste por sulfatos al igual que el porcentaje de absorción.

- Luego de la caracterización de los materiales, se diseñó en laboratorio las mezclas asfálticas mediante el método Marshall, de acuerdo a los procedimientos estipulados por en el “Manual de ensayos y materiales asfálticos” elaborado por la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.). La mezcla asfáltica convencional comprendía la primera fórmula de trabajo, con 5 grupos de 3 briquetas, donde el porcentaje de cemento asfáltico era variado. Las mezclas asfálticas con la incorporación de vidrio molido comprendían las otras 4 fórmulas de trabajo (5%, 10%, 15% y 20% de vidrio molido), igualmente con 5 grupos de 3 briquetas cada fórmula.
- En cuanto al diseño Marshall que se realizó y los resultados obtenidos en cada formula de trabajo, se puede afirmar que todas las mezclas asfálticas estudiadas presentan una similar tendencia en su comportamiento, tanto la mezcla de referencia y las mezclas con vidrio molido, tomando en cuenta la forma de la curvatura generada en las gráficas Marshall (Figura 54 – 64). Además, se observa que a medida que se incrementa el porcentaje de vidrio en la mezcla, disminuye la densidad Marshall, disminuye la cantidad de asfalto requerido, el contenido de huecos en mezcla aumenta, y los valores de estabilidad aumentan, si el vidrio molido es añadido de forma adecuada.
- Por otra parte, tomando en cuenta las propiedades Marshall según el porcentaje óptimo de cemento asfáltico en cada grupo de trabajo, se puede resaltar que el uso del vidrio molido aporta mayores beneficios a la mezcla asfáltica si es añadido en porcentajes comprendidos entre el 5% a 15%, siendo el 10% el porcentaje óptimo de vidrio molido a ser agregada en una mezcla asfáltica, ya que con este porcentaje presenta principalmente una mayor estabilidad, seguido de una mejor fluencia, densidad y porcentaje de vacíos en la mezcla.

Tabla 77: Propiedades Marshall según el porcentaje óptimo de cemento asfáltico

Mezcla asfáltica	Referencia	5% vidrio	10% vidrio	15% vidrio	20% vidrio	Especific.
% Optimo de cemento asfáltico	5.10	5.06	5.04	4.98	5.01	-
Densidad (gr/cm ³)	2.333	2.328	2.322	2.298	2.309	-
Estabilidad (Lb)	2274	2330	2392	1963	1556	>1800
Vacíos (%)	3.76	3.98	4.29	4.19	4.46	3 – 5
V.A.M. (%)	15.60	15.73	15.93	15.50	15.91	-
R.B.V. (%)	74.99	74.62	73.28	72.85	71.90	65 – 75
Fluencia (1/100 ^o)	11.07	11.16	11.52	11.06	10.84	8 - 14

Fuente: Elaboración propia

- Algunas otras características que se notaron luego del diseño de las briquetas como mezclas asfálticas fueron:
 - Las mezclas que contenían mayor porcentaje de vidrio molido añadido tardaban más en enfriar, lo cual asevera que las mezclas asfálticas con vidrio molido mantienen el calor más que la mezcla convencional. Esta característica podría resultar útil en la construcción de carreteras que se llevan a cabo en un clima frío, o cuando son necesarios largos periodos de transporte.
 - Además se pudo contrastar que cuando aquellas muestras con alto porcentaje de vidrio eran sumergidas en agua, éstas no absorbían cantidades grandes de agua, y el tiempo de secado era más rápido. Este hecho resultaría beneficioso en la construcción de carreteras, especialmente en zonas húmedas con periodos de lluvia prolongados, puesto que las precipitaciones serian desalojadas de forma más rápida otorgando la protección necesaria a las capas interiores.
 - Así mismo, se observó que las briquetas diseñadas con adición de vidrio molido son más reflectantes, lo cual podría ser de utilidad al mejorar la visibilidad de la carretera durante la noche.

- Se demostró mediante el análisis de costos que producir dichas mezclas asfálticas con la incorporación del 10% de vidrio molido simboliza un incremento de Bs 2.00/ m³ o de Bs 981.53/ km, en relación a mezclas asfálticas convencionales. Si bien, la diferencia de costos representa un incremento significativo, se debe tener en cuenta que se consideró la obtención del vidrio molido en el interior del país, lo que provoca un incremento en su costo; asimismo cabe recalcar que al usar el vidrio molido como agregado fino en mezclas asfálticas se mejora considerablemente las propiedades de la mezcla, además de crear carreteras sustentables.
- Otra ventaja significativa que representa la factibilidad del uso del vidrio molido en mezclas asfálticas es que no se requieren equipos especiales para su ejecución en obra, ya que el vidrio molido no representa peligro para los equipos e instrumentos usados comúnmente en los trabajos de asfaltado.
- Finalmente, en vista de todos los resultados satisfactorios obtenidos en la investigación, se puede asegurar que la reutilización de residuos de vidrio molido como arena en la construcción de carreteras supone una opción seria para la valorización del material, mediante la cual, además de eliminar la producción de un residuo, se ayuda a reducir el consumo de los recursos naturales que cada vez son más escasos, mejorando así las propiedades de las mezclas asfálticas convencionales.

4.2. Recomendaciones

- Luego de finalizada la investigación, se recomienda el cuidado que se debe tener al momento de tratar con materiales reciclados, puesto que muchas veces al encontrarse en desuso, rotas o quebradas, constituyen una amenaza para la salud de las personas; en el caso del vidrio es un material frágil, fácil de tratar, pero que resulta peligroso si no se toman las precauciones necesarias, ya que presenta aristas que pueden ocasionar cortes, además de la amenaza que representa para los humanos. el polvo generado al momento de la trituración.
- Procurar además, que los agregados utilizados provengan de fuentes con buena calidad, ya que cualquier mezcla asfáltica depende casi en su totalidad de las propiedades que ostentan los agregados pétreos.
- Resulta importante proseguir de manera cuidadosa y con la atención necesaria durante cada uno de los ensayos de laboratorio del “Manual de ensayos y materiales asfálticos” elaborado por la Administradora Boliviana de Carreteras (A.B.C.), desde la caracterización de los materiales hasta el diseño de las mezclas asfálticas, puesto que los valores obtenidos desde el comienzo de la investigación son usados hasta el final de la misma, y cualquier error podría repercutir en los resultados del estudio.
- Por otro lado, se recomienda darle continuidad a este trabajo de investigación con la realización de tramos de prueba y puesta en obra; para evaluar el desempeño que tendría las mezclas asfálticas diseñadas con vidrio molido, y así ver su comportamiento frente a las inclemencias del tiempo y cargas del tránsito.
- Además, debido a que la investigación presentada ha permitido ofrecer una solución eficiente a las problemáticas planteadas por la generación de residuos y que a pesar de haber definido un camino muy concreto de valorización del residuo, también se han abierto nuevas alternativas que pueden marcar futuras líneas de investigación en torno al tema.

Con el fin de ampliar las posibilidades de utilización de los residuos generados por el vidrio, se sugieren algunas de estas posibles líneas de estudio:

Estudio de la posibilidad de reutilización de los residuos de vidrio molido como filler en la fabricación de mezclas asfálticas.

Estudio de la posibilidad de reutilización de los residuos de vidrio como áridos para capas granulares de base en carreteras.