

## **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

Sin duda la magnitud de desarrollo vial de una nación evidencia el nivel de desarrollo socio-económico de la misma, basados en estos en los últimos años ha venido mostrando un gran desarrollo en este aspecto a través de la construcción de vías de comunicación.

Para lograr estos objetivos se han desarrollado asfaltos modificados a base de polímeros los cuales mejoran la eficiencia del material, pero no representa una alternativa ecológica en beneficio del medio ambiente.

Debido a la necesidad de mitigar el daño ambiental, se debe insistir en la reutilización y canalización de elementos reciclados para mejorar las mezclas asfálticas desarrollando así material con mejores características.

Actualmente una de las principales medidas a tomarse en cuenta por población mundial es reducir los índices de contaminación, razón por la cual a nivel mundial se están desarrollando proyectos que impulsan y promueven el reciclaje, tratamiento y reutilización de desechos, en este proyecto se analiza el uso de dos tipos de desechos generados por los vehículos, como neumáticos o llantas (alambre o fibra metálica que estos poseen), la limadura metálica producida por desperdicio de talleres mecánicos, metal mecánico y corte de acero en general.

Este material alambre o fibra metálica y limadura metálica puede ser adicionado a las mezclas asfálticas mediante procesos, mezclándolo con el ligante, y mezclándolo con los agregados.

Se pretende satisfacer la estabilidad y flujo Marshall para el diseño del pavimento con algunas modificaciones al remplazar en porcentaje los agregados por los residuos de la limadura metálica y el alambre de neumático fuera de uso para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas.

Los costos de los pavimentos flexible son elevados, por este motivo también se pretende justificar el remplazo de los agregados por el residuo de los desechos de limadura

metálica, fibra metálica del neumático fuera de uso, para reducir los costos y optimizar recursos económicos.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Un objetivo de este tipo de investigaciones es la reutilización de los desechos, conservación del medio ambiente, y el ahorro de energía aprovechándolos como materia prima para nuevos productos, por estos motivos se vuelve esencial la investigación, los impactos ambientales ocasionados por desechos no biodegradables en este caso limadura metálica, alambre de neumático fuera de uso.

Estos desechos contaminan el medio ambiente en cualquier área del planeta, ya que las calles o aceras, siendo expulsados al aire (quema de llantas), o simplemente desechados en el relleno sanitario esperando que el tiempo haga efecto sobre ellos, produciendo daños al planeta.

El presente proyecto se vuelve de gran importancia como una alternativa a la reutilización de desechos, de igual manera observando los éxitos llevados a cabo en diferentes partes del mundo y con el objetivo de encontrar el mejor resultado para la reutilización de los materiales metálicos.

El área de investigación principalmente es netamente experimental en mezclas asfálticas en caliente, donde intervienen diferentes materiales como ser agregado chancado, arena natural, cemento asfáltico 85 -100 y en este caso fibra metálica de llanta usada y limadura metálica reciclada,

Queriendo generar uso a desechos reciclados podemos definir una alternativa de uso a los materiales metálicos incluyéndolos como parte estructural de mezcla asfáltica para luego analizar, interpretar, evaluar los resultados mediante ellos brindar una opción eficiente y económica al mercado de este producto, mediante el empleo en diferentes porcentajes de fibra metálica y limadura metálica en reemplazo del agregado por la elaboración de mezclas asfáltica, presente un buen comportamiento aumentando la resistencia con un costo menor al convencional.

## **1.3 DISEÑO TEÓRICO**

### **1.3.1 Planteamiento del problema**

#### **1.3.1.1 Situación del problema**

Hoy en día se adicionan agentes modificadores para la mezcla asfáltica con el objeto de mejorar su comportamiento mecánico, al adicionar estos agentes cumplen con lo requerido para sus utilidades en carreteras, pero aun así ocasionan elevados costos.

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 a todo tipo de procedimientos permitidos de esa manera reducir la contaminación, crear nuevos productos con menos inversión de materia prima y minimiza la explotación de recursos renovables.

Por lo cual el presente estudio, analizará técnica y económicamente la alternativa de uso a los materiales metálicos reciclados incluyéndolos como parte estructural de mezcla asfáltica, para ello se debe analizar, interpretar, evaluar los resultados mediante ellos brindar una opción eficiente y económica al mercado de este producto, mediante el empleo en diferentes porcentajes de fibra metálica de neumático fuera de uso y limadura metálica en reemplazo del agregado por la elaboración de mezclas asfálticas, presente un buen comportamiento aumentando la resistencia con un costo menor al convencional.

#### **1.3.1.2 Determinación del problema**

¿Cómo un análisis de comportamiento de una mezcla asfáltica añadiendo desechos reciclados limadura metálica y fibra metálica de neumático fuera de uso, nos puede brindar mejoramiento en las características Marshall y económica?

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo general**

Diseñar una mezcla asfáltica caliente, como alternativa para la reutilización de residuos metálicos reciclados: limadura metálica y alambre de neumático fuera de uso, analizando y comparando las características del ensayo Marshall y costo económico con una mezcla asfáltica convencional.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar los agregados y cemento asfáltico 85-100 utilizado en la mezcla asfáltica, deber cumplir con la siguiente caracterización mediante ensayos establecidos por las normas ASTM.
- Elaborar briquetas de mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de la adición de limadura metálica y fibra metálica de neumático fuera de uso en el remplazo de agregados, usando en cada diseño los procedimientos del método Marshall.
- Determinar la incidencia de la inclusión de los materiales metálicos reciclados, en el porcentaje óptimo de cemento asfáltico a medida que se aumenta en material modificador.
- Comparar y Analizar los resultados obtenidos de las 2 mezclas, las desarrolladas con: 1) limadura metálica 2) fibras metálicas de neumáticos fuera de uso, en base a estos determinar la mezcla asfáltica que brinde los mejores resultados en comparación con la mezcla asfáltica diseñada convencionalmente.
- Determinar la incidencia en el costo de una mezcla asfáltica con la inclusión de los materiales reciclados, limadura metálica y fibra metálica de neumático fuera de uso versus una mezcla asfáltica convencional.
- Establecer conclusiones y recomendaciones.

### **1.5 HIPOTESIS**

Si aplicamos diferentes porcentajes de limadura metálica y fibra metálica de neumático fuera de uso en la mezcla asfáltica nos permitirá obtener mejoras en las propiedades Marshall en comparación de la mezcla asfáltica convencional, para pavimentos flexible de tráfico pesado y a menor costo.

### **1.6 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES**

#### **1.6.1 Variables independientes**

Los porcentajes de limadura metálica y fibra metálica de neumático fuera de uso en la mezcla asfáltica,

#### **1.6.2 Variables dependientes**

Estabilidad y flujo (Marshall), mezcla asfáltica.

### 1.6.3 Conceptualización y operación de variables

Tabla N° 1.1. Conceptualización y operación de variables

Variable Nominal	Conceptualización	Operación		
		Dimensión	Indicador	Valor acción
<b>Variables independientes</b>  Los porcentajes de limadura metálica y fibra metálica de neumático fuera de uso en la mezcla asfáltica.	Se refiere al distinto porcentaje de material reciclable (limadura metálica y fibra metálica de neumático fuera de uso) que se adicionará a las mezclas asfálticas convencionales.	Diseño de mezcla asfáltica adicionando limadura metálica y fibra metálica de neumático fuera de uso.	% del 0.5 al 2.5 % a cada 0.5 % de material reciclado  % de cemento asfáltico.  % de agregados.	Elaboración de briquetas
<b>Variables dependientes</b>  Estabilidad y flujo (Marshall),	Se refiere a los parámetros que se caracterizan a la resistencia de una mezcla asfáltica, la estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica.	Evaluación de las mezclas asfálticas de los tres diseños.	Mezcla asfáltica convencional.  Mezcla asfáltica con porcentajes de limadura metálica.  Mezcla asfáltica con porcentajes de fibra metálica de neumático fuera de uso en reemplazo de los agregados	Ensayos método de Marshall

Fuente: Elaboración propia

## 1.7 DISEÑO METODOLÓGICO

### 1.7.1 Componentes

#### 1.7.1.1 Unidad de estudio

Mezcla asfáltica

#### 1.7.1.2 Población

Mezcla asfáltica modificada

### **1.7.1.3 Muestra**

Mezcla asfáltica caliente convencional.

Mezcla asfáltica adicionando alambre de neumáticos fuera de uso

Mezcla asfáltica adicionando limadura metálica reciclados

### **1.7.1.4 Muestreo**

El alambre metálico de neumático en desuso se obtendrá la extracción en una reencauchadora que pueda tratar realizar proceso por lo que en la ciudad de Tarija no se encuentra máquinas destalonadora de neumático. La limadura metálica se obtendrá de los desechos de las metalúrgicas de la ciudad de Tarija acumulando el material ya que es la molienda de diferentes objetos de chatarra metálica. En el caso de asfalto se empleará asfalto 85 -100, y se obtendrá del Municipio de la ciudad de Tarija, los materiales pétreos (grava, gravilla triturada y arena) que se obtendrán del banco de SEDECA en San José de Charaja.

## **1.8 MÉTODO Y TÉCNICAS EMPLEADAS**

### **Selección o elaboración de los métodos y técnicas en función del objeto y de los objetivos**

Para el desarrollo del proyecto se ha procedido conforme al método analítico – práctico, el cual consiste en descomponer el objeto de estudio separando cada una de las partes del tema general para estudiarlas en forma individual con el fin de llegar a un resultado común y coherente a base de análisis de los resultados presentados mediante la investigación.

El presente trabajo de investigación consiste en llevar a cabo los ensayos de laboratorio necesarios para conocer las propiedades mecánicas y volumétricas de la mezcla asfáltica adicionando material reciclado propuestos, de esta forma se llegará a la obtención de las conclusiones del trabajo de investigación.

### **Técnica de muestreo**

#### **Técnica de investigación experimental**

La investigación experimental está integrada por un conjunto de actividades metódicas y técnicas que se realizan para recabar la información y datos necesarios sobre el tema a investigar y el problema a resolver. La investigación experimental se presenta mediante la manipulación de una variable experimental no comprobada, en condiciones

rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular, su diferencia con los otros tipos de investigación es que el objetivo de estudio y su tratamiento dependen completamente del investigador, de las decisiones que tome para manejar el experimento. El experimento es una situación provocada por el investigador para introducir determinadas variables de estudio manipuladas por él para controlar el aumento o la disminución de las variables y el efecto en las conductas observadas.

En el experimento, el investigador maneja de manera deliberada la variable experimental y luego observa lo que ocurre en condiciones controladas. La experimentación es la repetición voluntaria de los fenómenos para verificar su hipótesis.

La técnica a utilizar será de forma experimental a través de ensayos de laboratorio, como base se tomará los ensayos descritos en el manual de ensayos de suelos y materiales-asfaltos del “Manual de carreteras V4a de ABC”, para realizar la dosificación de la mezcla.

### **Ensayos previos a realizar**

Los agregados de aportación se obtendrán de la planta de asfaltos del SEDECA de la ciudad de Tarija.

El cemento asfáltico aportación se obtendrán de la planta de asfaltos del Municipio de la ciudad de Tarija.

Con los agregados y el cemento asfáltico se utilizará la técnica experimental con ensayos en el laboratorio que caracterizaran dichos materiales, se procede a diseñar la mezcla asfáltica con el cemento asfáltico 85-100, con la granulometría de los agregados y haciendo variar los porcentajes de los materiales reciclados propuestos en la investigación.

Tabla N° 1.2. Normas y ensayo de aplicación

Parámetro	Ensayo	Norma ASTM
Caracterización de agregados	Granulometría	C-136
	Gravedad específica agregado grueso	C-127
	Gravedad específica agregado fino	C-128
	Degradación o abrasión de los Ángeles	C-131
	Caras fracturadas	D-5821
	Equivalente de arena	D-2419
Caracterización del cemento asfáltico	Punto de inflamación	D-1310
	Penetración	D-5
	Gravedad específica	D-70
	Pérdida de masa	D-1754
	Punto de ablandamiento	D-36
	Ductilidad	D-113
	Viscosidad Saybolt-Furol	E-102
Caracterización de agregados de residuo reciclado	Gravedad específica	D-2419
Diseño Marshall	Ensayo Marshall.	D-1559
	Elaboración de especímenes	D-6926
	Densidad Bulk	D-2726
	Gravedad específica teórica máxima	D-2041
	Estabilidad y fluencia Marshall	D-6927

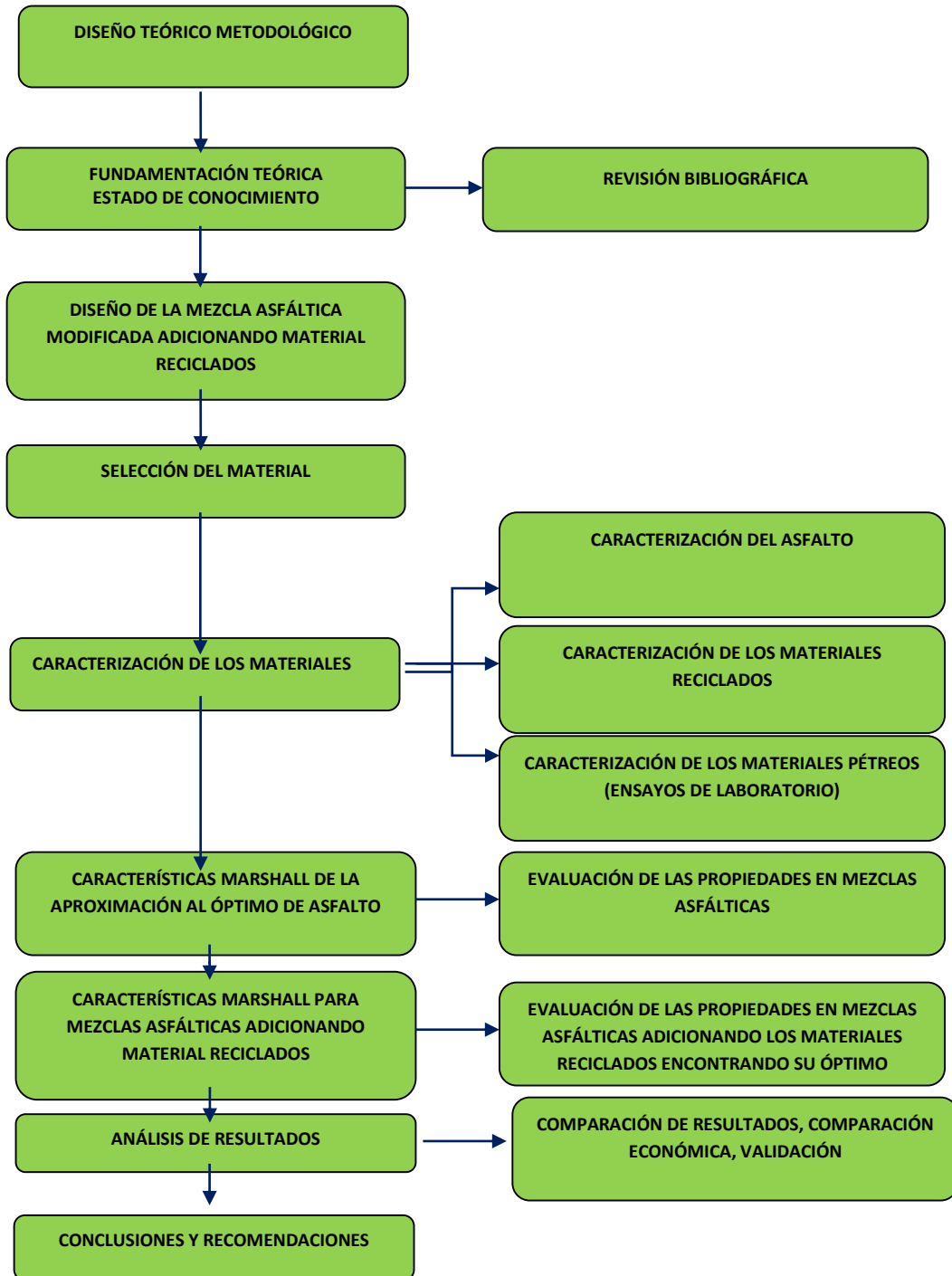
Fuente: Elaboración propia



## 1.9. METODOLOGÍA

### 1.9.1 Diagrama metodológico

Figura N° 1.1. Esquema metodológico



Fuente: Elaboración propia

La metodología inicia con la selección de material que será parte de la mezcla asfáltica, para luego caracterizar los materiales, y continuar con el diseño y estudio de las propiedades estáticas; estabilidad y deformación (flujo) de las mezclas asfálticas en caliente modificadas utilizando el aparato Marshall por el método inclusión del material modificador por vía seca.

En la metodología de trabajo se consideran los siguientes pasos:

- Selección de material que serán parte de la mezcla asfálticas: agregado pétreo, cemento asfáltico, residuo metálico reciclado
- Determinar las características y propiedades de los agregados pétreos mediante los ensayos: granulometría, equivalente de arena, abrasión, peso específico, caras fracturadas, aplicando las respectivas normas ASTM.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas del ligante asfáltico mediante los ensayos: penetración, punto de ablandamiento, peso específico, ductilidad, viscosidad Saybolt Furol, pérdida de masa punto de inflamación, aplicando las respectivas normas ASTM.
- Determinar el peso específico de la limadura metálica reciclada y el alambre de neumático fuera de uso.
- Diseñar una mezcla asfáltica en caliente convencional sin adición de materiales modificadores mediante el Método Marshall, obteniendo el porcentaje óptimo de asfalto.
- Diseñar una mezcla asfáltica modificada con limadura metálica y alambre de neumático fuera de uso, determinar el porcentaje óptimo de asfalto para cada aumento de material modificante, mediante el Método Marshall.
- Diseñar una mezcla asfáltica modificada con limadura metálica y alambre de neumático fuera de uso, determinar el porcentaje óptimo de material modificador, mediante el Método Marshall.
- Analizar los resultados en los ensayos realizados en cada una de las mezclas asfálticas, y comparar las propiedades estáticas y volumétricas entre la mezcla tradicional y las mezclas modificadas.

El número de briquetas que se necesitarán para realizar los ensayos de estabilidad y de fluencia del ensayo Marshall, con la adición de diferentes porcentajes de residuo de alambre de neumáticos fuera uso de y limadura metálica reciclados serán los siguientes:

Tabla N° 1.3. Número de muestras para obtener el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para la mezcla asfáltica convencional

Grupo 1	% de cemento asfáltico	% de residuo metálico reciclado	Número de muestras
Mezcla asfáltica convencional	4.5	0	3
	5.0	0	3
	5.5	0	3
	6.0	0	3
	6.5	0	3
	Total número de briquetas		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.4 Número de muestras para obtener el porcentaje óptimo de mezcla asfáltica añadiendo limadura metálica reciclada

Grupo 2	N° de diseño	% de cemento asfáltico	% de residuo metálico reciclado	Número de muestras
Mezcla asfáltica adicionando limadura metálica reciclada	2.1	4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %, 6.5 %	0.5	15
	2.2	4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %, 6.5 %	1.0	15
	2.3	4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %, 6.5 %	1.5	15
	2.4	4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %, 6.5 %	2.0	15
	2.5	4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %, 6.5 %	2.5	15
	2.0	Incidencia de adición de % óptimo de cemento asfáltico en cada aumento de adicinante de residuo metálico reciclado	0.5 %, 1.0 %, 1.5 %, 2.0 %, 2.5 %	15
	Total número de briquetas			

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 1.5. Número de muestras para obtener el porcentaje óptimo de la mezcla asfáltica añadiendo alambre de neumático fuera de uso

Grupo 3	N° de diseño	% de cemento asfáltico	% de residuo metálico reciclado	Número de muestras
Mezcla asfáltica añadiendo alambre de neumático fuera de uso	3.1	4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %, 6.5 %	0.5	15
	3.2	4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %, 6.5 %	1.0	15
	3.3	4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %, 6.5 %	1.5	15
	3.4	4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %, 6.5 %	2.0	15
	3.5	4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %, 6.5 %	2.5	15
	3.0	Incidencia de adición de % óptimo de cemento asfáltico en cada aumento de adicinante de residuo metálico reciclado	0.5 %, 1.0 %, 1.5 %, 2.0 %, 2.5 %	15
	Total número de briquetas			

Fuente: Elaboración propia

Dichos porcentajes se adaptaron debido al volumen de los materiales reciclados metálicos y a la mejor trabajabilidad del mismo para poder realizar las briquetas.

Para los ensayos de la resistencia de estabilidad y fluencia del ensayo Marshall. Se realizarán en 75 briquetas con diferentes porcentajes de cemento asfáltico, con cada aumento de residuo metálico reciclado para obtener el porcentaje óptimo de cemento asfáltico por la incidencia de la adición de los materiales metálicos reciclados modificadores, se realizarán 15 briquetas para obtener el porcentaje óptimo de residuo metálico reciclado esto tanto para material de alambre de neumático fuera de uso y limadura metálica reciclada, 15 briquetas de mezcla asfáltica convencional, para obtener el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, que serán un total de 195 briquetas.

### **1.10 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

El diseño de la mezcla asfáltica con la adición de alambre de neumáticos fuera de uso y limadura metálica reciclados se lo llevará a cabo con el fin de conocer si añadiendo este elemento en diferentes proporciones en reemplazo del agregado pétreo en la mezcla total modificará su resistencia y deformación, basado como indicador en una mezcla asfáltica convencional que permita el análisis técnico y económico de la adición de alambre de neumáticos fuera de uso y limadura metálica reciclados, este diseño determinara mejorar la resistencia y el costo de un pavimento flexible.

Se comparará los resultados obtenidos por las pruebas de laboratorio según método Marshall, referido a los vacíos de la mezcla, estabilidad, fluencia, vacíos de agregados minerales y vacíos de asfalto, de los dos diseños de mezcla asfáltica con su agregado óptimo de asfalto y material de residuo reciclado metálico con la mezcla convencional.

Por otro lado, el estudio incluirá un análisis económico, que permita solventarla factibilidad o no de la reutilización de estos residuos metálicos como árido en la fabricación de mezclas asfálticas, comparando con la mezcla asfáltica convencional con la mezcla asfáltica más las inclusiones del porcentaje óptimo de los materiales reciclados definidos en el estudio.

PRIMER CAPÍTULO, describe de manera general de que trata la investigación para el conocimiento de alambre de neumáticos fuera de y limadura metálica reciclados que se aplicará en la mezcla asfáltica en reemplazo del agregado donde se dará a conocer la situación problemática, los objetivos, justificación, hipótesis y la técnica que se aplicará en el presente proyecto.

SEGUNDO CAPÍTULO, comprende la parte teórica donde se detallará el estado de conocimiento, es decir, toda la información necesaria irrelevante al proyecto, como es todo referente a mezclas asfálticas, los materiales de alambre de neumáticos fuera de y limadura metálica reciclados y los agregados a utilizar, diseño de la mezcla asfáltica según el método de Marshall, normas, etc.

TERCER CAPÍTULO, describe los medio y criterios para obtener los datos de caracterización del agregado, cemento asfáltico, los desechos metálicos propuestos.

CUARTO CAPÍTULO, comprende el diseño de briquetas con el método de Marshall, en planta en caliente con tres tipos de análisis, el primero con la mezcla asfáltica

convencional sin los materiales reciclados, el segundo con la mezcla asfáltica adicionando únicamente limadura metálica, el tercero con la mezcla asfáltica adicionando únicamente alambre metálico de neumático fuera de uso, con la variable dependiente que es propiedades y características Marshall.

Por otro lado, el estudio incluirá un análisis económico que permita solventar la factibilidad o no de la reutilización de este residuo como agregado en la fabricación de mezcla asfáltica.

QUINTO CAPÍTULO, establecerá las conclusiones a partir de lo planteado en los objetivos dándose a conocer los resultados finales de las comparaciones que se tendrán de las mezclas asfálticas con la adición de alambre de neumáticos fuera de y limadura metálica reciclados en reemplazo de los agregados pétreos de la mezcla total y de las mezclas asfálticas convencionales del presente proyecto y las recomendaciones para la correcta aplicación y ejecución de esta investigación.

## CAPÍTULO II

### MEZCLAS ASFÁLTICAS

#### 2.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS

##### 2.1.1 Definición

Una mezcla asfáltica, también denominada aglomerado, en general es una combinación de un ligante asfáltico 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 N° 2.1. 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. Los procesos 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 al 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 al 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 Rodríguez, 2004)

Tabla N° 2.1. Clasificación de mezclas asfálticas

Parámetro de clasificación	Tipo de mezcla
Fracciones de agregado empleadas	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En frio
	En caliente
Huecos en la mezcla (h)	Cerradas ( $h > 6 \%$ )
	Semi cerradas ( $6 \% < h < 12 \%$ )
	Abiertas ( $h < 12 \%$ )
	Porosas ( $h > 20 \%$ )
Tamaño máximo del agregado (t máx.)	Gruesas (t máx. $> 10 \text{ mm}$ )
	Finas (t máx. $< 10 \text{ mm}$ )
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

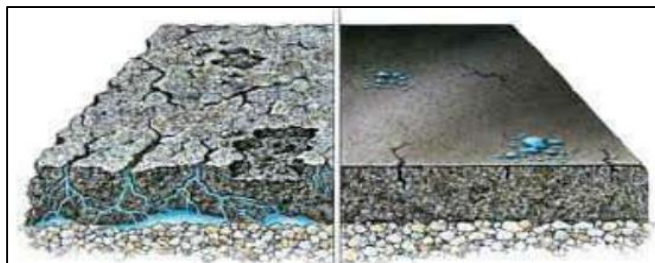
Las mezclas asfálticas como ya hemos visto anteriormente sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales; y como material con resistencia simplemente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

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.

Figura N° 2.2. 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 N° 2.2 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 N° 2.3. 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

## 2.2 AGREGADOS EN MEZCLA ASFÁLTICA

### 2.2.1 Definición

Se entiende como agregado mineral, aun conjunto de partículas minerales secas, de una determinada distribución de tamaños, con una norma, angulosidad, rugosidad y dureza aceptable, limpias y libres de materiales deletéreos u otra materia contaminante, compatible para una apropiada adherencia a un ligante bituminoso determinado, para formar parte de una mezcla bituminosa, la misma que será parte de un pavimento. El uso de agregados para mezclas que utilicen emulsiones asfálticas pueden requerir condiciones humedad particulares para los agregados.

Para la obtención de una fracción o fracciones de características particulares aceptables, el material grueso será triturado y cribado, mientras que el material fino podrá ser producto de trituración de piedra o arena natural.

## **2.2.2 Tipos de agregados utilizados en mezclas asfálticas**

### **2.2.2.1 Agregado grueso**

Los agregados gruesos son partículas grandes, mayores aproximadamente a 2.5 mm (0.1”) normalmente son obtenidos de gravas naturales de lechos de río, rocas trituradas o de grava trituradas.

### **2.2.2.2 Piedra triturada**

El material bruto para piedra debe provenir de roca dura, como arenisca, basalto, piedra caliza u otra piedra de calidad equivalente, o piedra de canto rodado con un tamaño de partícula de por lo menos tres veces más grande que el tamaño máximo requerido para producto final.

El producto triturado puede ser tamizado para obtener el tamaño del agregado deseado. Algunas veces, razones de economía, el material triturado es usado tal como se lo produce con un ligero tamizado o sin él. Este agregado se lo denomina agregado “triturar sin cribar”, en muchas oportunidades pueden utilizarse en la construcción de pavimentos asfálticos.

Las piedras trituradas deben tener uniformemente, limpieza, dureza y durabilidad suficiente, y estar libres de una cantidad perjudicial de partículas planas o alargadas, sucias con barro o con materiales orgánicos y otras sustancias perjudiciales.

### **2.2.2.3 Grava triturada**

Grava triturada son piezas trituradas de canto rodada o grava para hacerlo más apropiada para su uso en mezclas asfálticas para pavimentación. La calidad puede ser mejorada por medio de trituración, al cambiar la textura superficial de las partículas redondeadas en partículas angulosas con mejoras además en la distribución o rangos de tamaño de las partículas. Las proporciones de las partículas que tienen una o más caras fracturadas, tiene que ser mayor al 75 % del paso total de partículas retenidas en un tamiz 4.75 mm sin otro procesamiento, este producto de grava triturada o chancada se llama “triturada sin cribar”.

#### **2.2.2.4 Arena**

El agregado fino, presenta tamaños menores aproximados de 2.5 mm (0.1”) son obtenidos de arena natural provenientes de fracciones finas, los áridos finos son aquellos que pasan el tamiz N° 4.

La arena se clasifica en arena natural, arena artificial, polvo trituración y arena especial.

La arena natural se clasifica, por el lugar de excavación por arena de río, arena de cantera y arena de mar.

La arena artificial es producida por la trituración de roca o piedra de canto rodeado. Las arenas son partículas rocosas que pasan por el tamiz N° 4 y quedan retenidas en el tamiz N° 200 y el material que pasa el tamiz N° 10 y retenidos en el tamiz N° 40 se considera arenas gruesas. Las partículas que pasa el tamiz N° 8 o menos, que se obtienen durante la producción de piedra triturada, se mencionan como “polvo de trituración”.

#### **2.2.2.5 Filler**

Relleno mineral es un producto mineral finamente dividido del que al menos el 65 % pasa por el tamiz N° 200. La piedra caliza pulverizada es el filler más frecuentemente empleado, aunque pueden utilizarse también otros polvos de piedra, cal apagada, cemento portland y algunos sustanciales minerales muy finas y otras de origen volcánicas.

El filler aumenta en muchos casos la estabilidad y la calidad de una mezcla, ayudando en la aportación de agregado fino cuando se utilizan gradaciones cerradas o densa, en estos casos es frecuente el empleo principalmente polvo mineral (porción de los áridos finos que pasa el tamiz N° 200), y otros fillers.

El polvo mineral es usado principalmente como filler para la mezcla de asfalto en caliente. Es la parte de los áridos que pasa por el tamiz N° 200. puede consistir en partículas finas de los áridos finos o gruesos y/o filler mineral. El filler se produce triturando piedra caliza o roca volcánica y debe contener menos del 1 % de agua y está libre de aglomerados, no contendrá sustancias orgánicas ni partículas de arcilla, Cuando

se almacena el filler mineral, se debe evitar cualquier contacto con agua o humedad, porque se vuelve inservible cuando esta mojado.

### **2.2.3 Ensayos para calidad de los agregados**

Para muchos ingenieros de materiales, la resistencia del material es frecuentemente considerada como un factor de calidad, sin embargo, este no es el caso necesariamente para mezclas en caliente. Una estabilidad extremadamente alta de las mezclas asfálticas, muchas veces, es obtenida a expensas de bajar la durabilidad de los agregados, y viceversa.

Los áridos emplean, combinados con los asfaltos de diversos tipos, para preparar mezclas de usos diversos. Como los áridos constituyen normalmente el 90 % al 95 % en peso de las mezclas asfálticas sus propiedades tienen gran influencia sobre las del producto terminado. Los áridos más empleados son piedra canto rodado, grava triturada o natural, natural y filler natural.

En la construcción de pavimentos asfálticos el control de las propiedades de los áridos es tan importante como el de las del asfalto.

El agregado de la superficie del pavimento o cerca de ella requiere una dureza mayor que el agregado de las capas inferiores donde las cargas resultan disipadas o no son tan concentradas.

Tabla N° 2.4. Ensayos de laboratorio normalizados para agregados.

Ensayos de laboratorio para agregados	Norma	Propósito
<b>Granulometría</b>	<b>AASHTO T 27 ASTM C 136</b>	La deformación de la composición de un material pétreo que se pretenda emplear en la elaboración de la mezcla asfáltica es de primordial importancia porque en función de ellas se conoce de ante mano la clase de textura que tendrá la mezcla.
<b>Desgaste</b>	<b>AASHTO T 96 ASTM C 131</b>	el objetivo la calidad del material pétreo desde el punto de vista de su desgaste, ya sea para el grado de alteración del agregado o por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste. Esta caracterización esencial cuando el agregado va estar sujeto a desgaste por abrasión como el caso de los pavimentos. Es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comportarse el agregado, bajo los efectos de la abrasión causada el tráfico además de la idea del grado de intemperie que poseen los agregados
<b>Equivalente de Arena</b>	<b>AASHTO T 176 ASTM D 2419</b>	Descubre el exceso de arcilla en los agregados, ya que es un medio rápido de separar las partículas más finas (arcillosas de los granos más gruesos o de arena).
<b>Cubicidad de Partículas</b>	<b>ASTM D 692</b>	Se utiliza para determinar valores como el índice de laja y cubicidad de las partículas que compone el material pétreo. Las partículas de los agregados deben ser limpias, duras, resistentes y durables por lo que debe evitarse partículas débiles quebradizas o laminadas ya que son perjudiciales
<b>Gravedad específica y absorción del agregado grueso y fino</b>	<b>AASHTO T 84 ASTM C 127 AASHTO T 85 ASTM C 128</b>	La gravedad específica o aparente se refiere a la densidad relativa del material sólido de las partículas constituyentes, no se incluye aquí los espacios, vacíos que contiene las partículas los cuales son accesibles al agua.  El valor de absorción es usada para calcular el cambio en el peso de un agregado provocado por el agua absorbida en los poros accesibles de las partículas que constituye el material comparando con la condición seca se evalúa el comportamiento del agregado con el agua durante el periodo largo tal, que se logre alcanzar el valor potencial de absorción del mismo.
<b>Peso unitario y vacío</b>	<b>AASHTO T 19 ASTM C 29 M</b>	En la practica el valor de peso unitario es muy utilizado a realizar conversiones de volúmenes a pesos de agregado a utilizar en las mezclas de concreto asfáltico.  La dosificación óptima de la mezcla de agregados para mezclas de superficie en pavimentos puede realizarse utilizando el método de peso unitarios, el cual consiste elaborar una gráfica( parecida a la del próctor) en la cual se gráfica las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las ordenadas.

Fuente: Instituto de asfalto



Tabla 2.5. Requisitos de calidad del material pétreo de granulometría densa

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de los Ángeles, %	35
Partículas alargadas y lajeadas, % máximo	40
Equivalente de arena, % mínimo	50
Perdida de estabilidad por inmersión en agua, % máximo	25

Fuente: Construcción de pavimentos. Serie de manuales (MS-22)

## **2.3 ASFALTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

El uso moderno del asfalto para carreteras y construcción de calles comenzó a fines del siglo pasado, y creció rápidamente con el surgimiento de la industria automotriz. Desde entonces, la tecnología del asfalto ha dado grandes pasos, hoy día los equipos y los procedimientos usados para construir estructuras de pavimentos asfálticos son bastante sofisticados.

Una regla que no ha cambiado a través de la larga historia del asfalto en la construcción, es la siguiente: un pavimento es tan bueno como los materiales y calidad del proceso constructivo.

### **2.3.1 Definición de asfalto**

Los asfaltos son una mezcla compleja de hidrocarburos de peso molecular elevado, que se presentan en forma de cuerpo viscoso más o menos elástico, no cristalino y de color negro. Son productos de la destilación natural o artificial del petróleo. Es el residuo sólido que queda una vez que se hayan extraído los componentes más ligeros y volátiles del petróleo.

Aunque el asfalto puede considerarse como un desecho, también puede verse como un producto de gran calidad, sobre el que se fundamenta gran parte de la construcción de los pavimentos flexibles, denominados también pavimentos asfálticos o pavimentos bituminosos, en virtud de este dúctil, flexible y tenaz material que los constituye y caracteriza.

Casi todo el asfalto usado es producido por refinerías modernas de petróleo y es llamado asfalto de petróleo. El grado de control permitido por los equipos modernos de refinería permite la producción de asfaltos con características distintas, que se prestan para usos específicos. Como resultado, se producen asfaltos para pavimentación, techado y otros usos especiales.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso (espeso) y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento para unir partículas de agregado en un pavimento de mezcla en caliente. El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales. Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daño químico.

El asfalto cambia cuando es calentado a temperatura muy elevada y/o es envejecido. Tiende a volverse duro y frágil y también a perder parte de su capacidad de adherirse a las partículas de agregado. Estos cambios pueden ser minimizados si se comprenden las propiedades del asfalto, y si se toman medidas, durante la construcción, para garantizar que el pavimento terminado sea construido de tal manera que pueda retardarse el proceso de envejecimiento.

### **2.3.2 Cualidades de los ligantes asfálticos**

Se mencionarán las cualidades que los hacen tan apreciables en el campo de construcción y mantenimiento de vías de comunicación.

#### **2.3.2.1 Poder aglomerante**

Los ligantes asfálticos tienen la propiedad de bajar su viscosidad con la temperatura, de tal modo que se convierte en una sustancia fluida que se adhiere y envuelve con mucha facilidad a los agregados pétreos, al tiempo que los aglomera.

Este poder aglomerante del asfalto, aumenta al enfriarse y se incrementa la superficie de contacto entre las partículas mediante la compactación, dando lugar a una mezcla asfáltica de características particulares para la construcción de cada una de las diferentes capas del pavimento, en especial, de base, intermedia y rodadura.

### **2.3.2.2 Agente estabilizante**

Los ligantes asfálticos al ser usados como estabilizadores en materiales granulares, dan como resultado una alta estabilidad, por lo que son considerados al igual que el cemento, la cal y otros conglomerantes hidráulicos (agentes estabilizantes que permiten dar dureza, cohesión y resistencia a los materiales granulares sueltos).

La principal diferencia entre los aglomerantes asfálticos y los conglomerantes hidráulicos es que mientras éstos últimos dan lugar a materiales con una alta resistencia, de comportamiento elástico, frágiles e insensibles a la temperatura, los otros, se caracterizan por una menor resistencia y un comportamiento que depende de la temperatura y del tiempo de aplicación de la carga, pueden asumir deformaciones pequeñas por largos periodos de tiempo permitiendo adaptarse a los pequeños asientos y deformaciones que experimentan las capas inferiores del pavimento.

El poder aglomerante y estabilizante del asfalto se ve también grandemente modificado y mejorado al mezclarse con el filler, teniendo una gran repercusión la calidad del mastico sobre el comportamiento de la mezcla. Es por ello que a los pavimentos constituidos por capas granulares y mezclas asfálticas se les conoce como pavimentos flexibles, frente a los constituidos por capas de concreto, más elásticas e indeformables, que se denominan pavimentos rígidos.

### **2.3.2.3 Agente impermeabilizante**

Los ligantes asfálticos recubren a los materiales granulares a través de una capa impermeable haciendo inaccesible el paso del agua, al mismo tiempo que se logra conseguir el relleno de los huecos dejados por el material granular, con lo que se obtienen materiales totalmente impermeables.

### **2.3.2.4 Manejabilidad**

El ligante asfáltico por sus propiedades, al ser calentado se vuelve fácil de mezclar, colocar y compactar.

### 2.3.3 Ensayos para caracterizar el cemento asfáltico

Tabla N° 2.6. Ensayos de laboratorio normalizados para el asfalto

Ensayos de laboratorio para asfalto	Norma	Propósito
<b>Viscosidad Saybolt Furol</b>	<b>AASHTO 201 ASTM E 102</b>	Es el diseño de mezclas asfálticas, las temperaturas de mezclado y compactación se definen en función de la viscosidad que posee el cemento asfáltico, ya que la trabajabilidad de mezcla asfálticas ve influenciada por la trabajabilidad que el asfalto tenga dentro de esta misma a una temperatura determinada de trabajo. Este ensayo se usa para clasificar los cementos asfálticos a viscosidad 130 °C mide la consistencia de los cemento asfálticos
<b>Penetración</b>	<b>AASHTO T 49 ASTM D 5</b>	Clasifica los asfaltos en grados según dureza o consistencia medida en decimas milímetros. Valores altos de penetración, indica consistencia suaves.
<b>Punto de inflamación</b>	<b>AASHTO T 48 ASTM D 92</b>	Tiene un propósito, identificar la temperatura a la cual es asfalto puede ser manejado y almacenando sin peligro que se inflame. El punto de inflamación se mide el ensayo en copa abierta Cleveland.
<b>Punto de reblandecimiento</b>	<b>AASHTO T 53 ASTM D 36</b>	La temperatura determinada como reblandecimiento, representa aquella a la cual un cemento asfáltico alcanzara un determinado estado de fluidez. Extendiendo consecuentemente una pérdida de consistencia del mismo. El punto de reblandecimiento es una prueba de resistencia la deformación del cemento asfáltico y además e también una prueba de la viscosidad.
<b>Peso específico</b>	<b>AASHTO T 228 AASHTO T 85 AASHTO T 84</b>	El peso específico de un cemento asfáltico no se indica normalmente en las especificaciones de la obra peor existe dos razones por las cuales se be conocer su valor y son: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura-volumen.</li> <li>• Es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos de un pavimento compactado.</li> </ul> Se determina normalmente por el método del picnómetro.
<b>Ductilidad</b>	<b>AASHTO T 51 ASTM D 113</b>	Provee de una mediad de las propiedades al estiramiento de los cementos asfálticos y el valor resultante puede ser usado como criterio de aceptación del material asfáltico ensayado. Se considera la ductilidad como capacidad que tienen el asfalto de resistir esfuerzos de estiramiento bajo condiciones de velocidad y temperatura a 25 °C.

Fuente: Instituto de asfalto

Tabla N° 2.7. Requisitos específicos para cemento asfáltico clasificado por penetración

Pruebas	Grado de penetración									
	40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Penetración a 25° C, 100 gr, 5 seg.	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Ensayo de Cleveland (°C)	232	-	232	-	232	-	218	-	177	-
Ensayo de Cleveland (°F)	450	-	450	-	450	-	425	-	350	-
Ductilidad 25 °C 5cm/mm, cm	100	-	100	-	100	-	100	-	-	-
Solubilidad en tri cloro etileno, porcentaje	99	-	99	-	99	-	99	-	99	-
Perdida por calentamiento, (%) a 163 °C en 5 horas	-	0.8	-	0.8	-	1.0	-	1.3	-	1.5
Penetración del residuo a 25 °C 5 cm/min,cm	58	-	54	-	50	-	46	-	40	-
Ductilidad de residuo a 25 °C 5 cm/min,cm	-	-	50	-	75	-	100	-	100	-

Fuente: Norma AASTHO M 20

## 2.4 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

### 2.4.1 Peso específico de los agregados

Como el agregado está compuesto por fracciones separadas del agregado grueso, agregado fino y filler natural, todos con distinto peso específico, los cálculos finales se verán simplificados de gran manera por el cálculo del peso específico bruto del agregado total. Los pesos parciales, se expresan en por cientos del peso total del agregado. Para introducir en la fórmula el peso específico del agregado grueso y el agregado fino se utiliza el peso específico masivo, y para el filler se usa el peso específico aparente, por lo tanto, la fórmula de peso específico promedio, del agregado mineral es la siguiente:

Nota: La fórmula será válida para el cálculo del agregado usando mezclas convencionales puesto que empleado solo para determinar el peso específico del agregado.

$$G_{\text{agre}} = \frac{PA}{VA} = \frac{100}{\frac{\%AG(a)}{G_{\text{agre}}(a)} + \frac{\%AF(b)}{G_{\text{agre}}(b)} + \frac{\%F(c)}{GF(c)} + \dots + \frac{\%A(n)}{G(n)}}$$

Donde:

$G_{\text{agre}}$  = Peso específico promedio del agregado mineral combinado

PA = Peso total expresado en porcentaje

AG (a), AF (b), F (c)..., A(n) Porcentaje de los agregados a, b, c..., n

$G_{\text{ag}}$  = Peso específico bruto de los agregados a, b, c...n

#### 2.4.2 Densidad máxima real de la mezcla

La mezcla asfáltica cuya densidad real requiere ser determinada, puede ser moldeada en laboratorio, u obtenerse directamente de un pavimento. El diámetro y longitud de las muestras deben ser no menores a cuatro veces el tamaño máximo del agregado empleando y su altura, por lo menos una vez y medio el tamaño del agregado la densidad real de la mezcla es común mente llamada peso unitario de mezcla asfáltica.

Las muestras obtenidas directamente de un pavimento deben ser representativas de la mezcla empleada y no contener materias extrañas al propio pavimento. Al hacer el ensayo, las muestras deben cubrirse con parafina derretida, al fin de tapar todos los poros, o vacíos de la mezcla, y delas muestras al aire en 30 minutos antes de pesarla.

La fórmula para determinar la densidad real de la mezcla de las briquetas es:

$$Dr = \frac{PV}{VP} = \left(\frac{gr}{cm^3}\right)$$

Donde:

Dr.= Densidad real de la mezcla (briqueta)

PV = Peso de briqueta

VP = Volumen de la briqueta sin parafina

### 2.4.3 Densidad máxima teórica

Peso máximo teórico, de una mezcla asfáltica, compacta es la que considera el volumen del agregado mineral y el del asfalto, sin tomar en cuenta el volumen de vacíos llenos de aire.

La densidad de la mezcla compacta está definida como su peso unitario (El peso de un volumen específico de mezcla). La densidad es una característica muy importante que se debe tomar en cuenta, debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$D \text{ max t.} = \frac{100}{\frac{\% C. A.}{GCA} + \frac{100 - \% C. A.}{G \text{ agreg}}}$$

Donde:

D máx. t. = Densidad máxima teórica

% C. A = Porcentaje de cemento asfáltico

GCA = Peso específico del cemento asfáltico

G agreg = Peso específico del agregado

En las pruebas y análisis de diseño de las mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa generalmente, en kilos por metro cubico ( $\text{kg/m}^3$ ), gramos por centímetros cúbicos ( $\text{gr/cm}^3$ ).

La densidad es calculada de multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

La densidad del agua obtenida en el laboratorio se convierte en densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminad es, o no adecuado. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad en el laboratorio.

#### 2.4.4 Vacíos de la mezcla

Expresado en porcentaje del volumen total la diferencia relativa entre la densidad teórica y la real para el estado de compactación alcanzado. El contenido de vacíos de aire (también llamado porcentaje de vacíos) es la concentración, en volumen del aire de la muestra compactada, la mezcla asfáltica compactada deberá tener un porcentaje de vacíos, comprendido entre 3 % al 5 % del volumen total de la mezcla.

Por lo tanto, como ya se indicó los vacíos de la mezcla se expresan como porcentaje del volumen total de la muestra. Representan el volumen que no es ocupado ni por asfalto ni por agregado. Los vacíos de aire son vacíos pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos de la mezcla final compactada. Es necesario que en todas las mezclas densamente graduadas contenga cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios donde pueda fluir el asfalto bajo esta compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos está entre 3 % al 5 % dependiendo del peso específico.

La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$V_m (\%) = \frac{D_{mt} - D_{rm}}{D_{mt}} * 100$$

Donde:

$V_m$  = Vacíos de la mezcla compactada

$D_{mt}$  = Densidad máxima teórica

$D_{rm}$  = Densidad real promedio

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos, la razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla, por los cuales puede entrar agua y aire, y causar deterioro, por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfaltos, una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.



Densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta es la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible de vacíos.

#### **2.4.5 Vacíos del agregado mineral V.A.M. %**

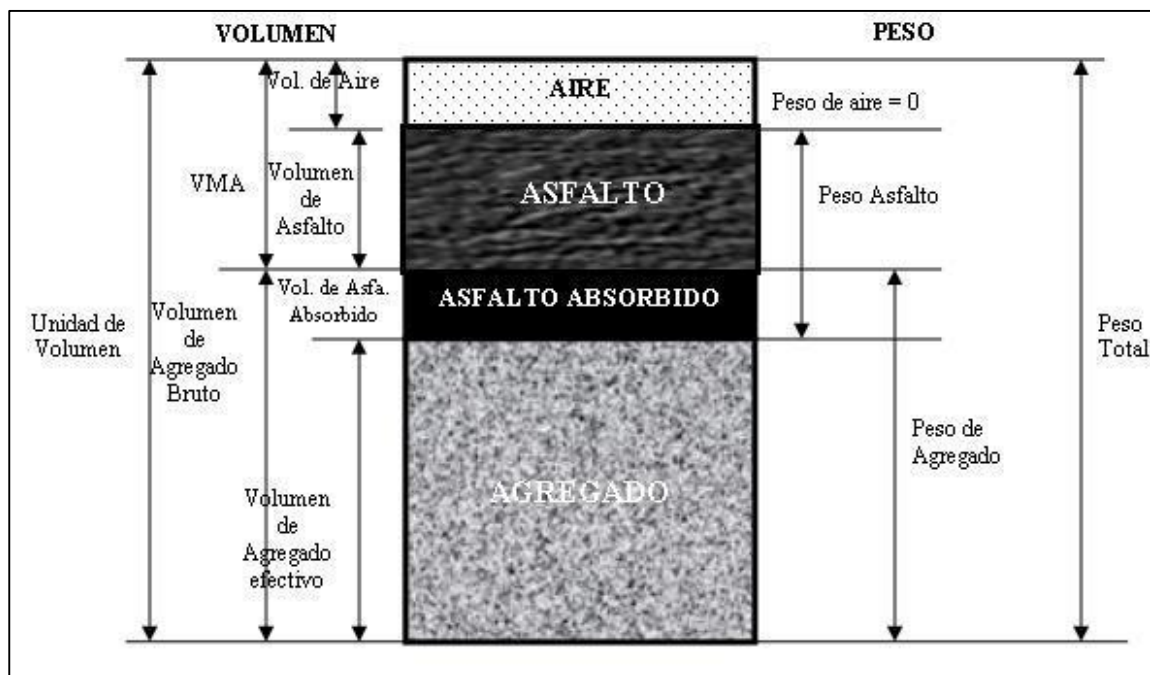
Expresado en porcentaje del volumen total, representa el volumen de vacíos existente en el agregado mineral al estado de densificación alcanzado. Parte del volumen de vacíos está ocupado por el cemento asfáltico. El espacio inter granular está ocupado por el asfalto y aire en una mezcla compactada denominada vacíos del agregado mineral (V.A.M.) por lo tanto, se define como la suma del volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo expresado como un porcentaje del volumen total. El volumen de asfalto absorbido no es usualmente considerado como parte del V.A.M.

Los vacíos del agregado mineral son expresados en porcentaje del volumen total de la muestra representan el volumen de la mezcla compacta que no es ocupada por el agregado. el espacio inter granular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla compacta se denominan vacíos del agregado mineral, en el diagrama de componente, la suma del volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo.

El volumen del asfalto absorbido por el agregado no es usualmente considerado como parte del V.A.M. por lo tanto los vacíos del agregado mineral, son espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compacta de pavimentación incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El V.A.M. representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos de mezcla.

Figura N° 2.3. Diagrama de componentes en una mezcla asfáltica



Fuente: Programa de carretera estratégica SHRP A-369, 1994.

Los valores recomendados para el V.A.M. de acuerdo al tamaño de las partículas se indica en la Tabla N° 2.16.

Cuanto mayor sea el V.A.M. más espacio habrá disponible por las partículas de asfalto. Existen valores mínimos para el V.A.M. como se detalla en el cuadro anterior los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuenta más gruesa sea una película de asfalto que cubra las partículas de agregado, más durable será la mezcla.

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se deben tener valores mínimos de VAM. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtenga valores VAM por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto con mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VAM para economizar el contenido de asfalto.

Cuando no es posible o practicable, por razones económicas u otras, alcanzar los requerimientos de especificaciones, se permite una tolerancia del 1 % en los vacíos

La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$VAM(\%) = Vm(\%) + \frac{CA(\%) * D_{rm}}{GCA}$$

Donde:

VAM (%) = Vacíos del agregado mineral

V<sub>m</sub> (%) = Vacíos de la mezcla compactada

CA (%) = porcentaje de cemento asfáltico

GCA = Peso específico del cemento asfáltica

D<sub>rm</sub> = Densidad real promedio

Bajo ninguna circunstancia se debe sobrepasar el valor de la fluencia o alcanzar valores inferiores a la estabilidad mínima requerida. Se debe enfatizar que esta variación se debe sobrepasar, solo bajo condiciones extremas, a menos que el comportamiento, con combinaciones específicas de agregados muestre condiciones satisfactorias para una mezcla asfáltica.

A medida que se reduce el tamaño de las partículas, estamos exigiendo un volumen mayor de asfalto, porque estamos aumento el área superficial, consecuentemente.

#### **2.4.6 Relación betumen vacíos**

Expresa el porcentaje de los vacíos del agregado mineral ocupado por el cemento asfáltico en la mezcla compacta.

Esta propiedad es el porcentaje de los vacíos del agregado mineral que contiene asfalto. La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$RBV = \frac{VAM(\%) - Vm(\%)}{VAM(\%)} * 100$$

Donde:

RBV (%) = Relación Betumen de vacíos.

VAM (%) = Vacíos del agregado mineral

Vm (%) = Vacíos de la mezcla compactada

#### **2.4.7 Estabilidad de la mezcla**

Se entiende estabilidad de la mezcla la carga máxima (carga de rotura) obtenida cuando se ejecuta el ensayo de acuerdo a las condiciones establecidas para ello, este parámetro se puede asimilar igualmente como una medida de la resistencia al corte de la mezcla.

La estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica es la carga máxima en libras que soporta una probeta aproximadamente de 6.35 cm de altura y 10 cm de diámetro cuando se la ensaya a temperaturas dada cargándola en sentido diametral a una velocidad de 5.8 cm/minuto. Es la resistencia al desplazamiento lateral de la mezcla asfáltica, la estabilidad es capacidad de la mezcla para resistir de formaciones provocadas por las cargas impuestas. Los pavimentos sin estabilidad sufren deformaciones (ahuellamiento y corrimiento u ondulaciones). La estabilidad depende de la fricción interna y de la cohesión.

La fricción interna depende de la textura superficial, granulometría del agregado, forma de las partículas, densidad de la mezcla y cantidad de asfalto. Es una combinación de la resistencia friccional y de la trabazón del agregado de la mezcla.

La resistencia friccional aumenta con la rugosidad superficial de las partículas del agregado. También aumenta con el área de contacto de las partículas. La resistencia por trabazón depende del tamaño y forma de las del agregado para cualquiera agregado dado, la estabilidad aumenta con la dosificación (hacer que el agregado sea compacto, apretado) de las partículas confinadas, la cual se logra mediante granulometría cerradas y adecuada compactación. El exceso de asfalto en la mezcla tiene a lubricar las partículas y a disminuir la fricción interna del esqueleto pétreo.

La cohesión es la fuerza del aglutinante propia de una mezcla asfáltica para pavimentación, el asfalto sirve para mantener las presiones de contacto desarrolladas entre las partículas de agregado. La cohesión varía directamente con la intensidad de la carga, el área cargada y la viscosidad del asfalto. Varía intensamente con la temperatura, la cohesión aumenta con el incremento del contenido de asfalto hasta un máximo y luego decrece generalmente para medir la estabilidad de una mezcla asfáltica o su resistencia al desplazamiento lateral, se emplea generalmente, diversos métodos, pero para nuestro uso de estudio se usa el método Marshall.

La estabilidad máxima en una masa de agregados no se alcanza hasta que la cantidad de asfalto que recubre todas las partículas ha llegado a un valor crítico, un porcentaje adicional del mismo actúa como lubricante más que como ligante, reduciendo la estabilidad de la mezcla, pero aumentando su durabilidad. Por esta razón es mejor conservar el contenido de asfalto un alto como sea posible conservando una adecuada estabilidad.

#### **2.4.8 Fluencia de la mezcla**

Es la deformación total expresada en centésimas de pulgada ( $1/100''$ ) que experimenta la probeta desde el comienzo de la aplicación de la carga en el ensayo de estabilidad, hasta el instante de producirse falla los valores de fluencia se incrementan, con el aumento del contenido de asfalto en la mezcla y viceversa.

El flujo es la deformación que ocurre en el instante de la rotura, y por tanto una medida de la plasticidad y capacidad de fluidez de la mezcla. Esta deformación se considera en la misma dirección de aplicación de la carga.

#### **2.4.9 Relación de estabilidad-fluencia**

Para entender que es una mezcla buena o mala, se recurre el concepto de rigidez analizando de una manera combinada los parámetros de estabilidad y flujo. Existe la falsa idea en nuestro medio de que una mezcla de alta estabilidad es general bueno, o que lleva de hecho a fortalecer la idea de fabricar mezclas muy rígidas, asunto que favorecer a la resistencia a la deformación asfáltica, pero a costo de una debilidad al fenómeno de la fatiga.

La tendencia a fabricar mezclas muy rígidas con la falsa idea de que mayor resistencia a la deformabilidad es positiva para la mezcla, genera, en consecuencia, una ausencia de la flexibilidad típica del pavimento asfáltico, que puede influir en la fisuración prematura de las capas asfálticas sometidas a tráfico pesado.

El problema de especificar independientemente estos parámetros radica en que se suele rechazar mezclas cuando algunos de estos no cumplen con valores establecidos para control, es decir, que se está argumentando que al cumplir con los parámetros de estabilidad y flujo de la mezcla es buena, pero antes de llegar a conclusión es indispensable verificar la rigidez de la mezcla, como una medida de su carácter deformable o quebradizo (dúctil o frágil). Una forma de controlar la rigidez de las mezclas, es empleada en la relación estabilidad/flujo, para verificar que se está evaluando de forma correcta la calidad mecánica de las mezclas asfálticas.

Para Marshall las especificaciones tienen un valor mínimo de estabilidad, pero no define un máximo, en consecuencia es frecuente ver que en muchos casos los diseños de mezclas asfálticas se toman valores extremadamente altos de estabilidad, sin tomar en cuenta que puede llegar a ser perjudicial, la estabilidad es un índice de la mezcla que indica rigidez, que al ser puesto en la estructura de pavimento, este será fácilmente quebradizo bajo las cargas del tránsito y, es susceptible a los agentes de la intemperie, degenerándose completamente hasta el punto de perder la capa asfáltica.

Tabla N° 2.8. Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento

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

Fuente: Principios de Construcción de mezcla asfáltica en caliente, MS 22, instituto de asfalto

#### **2.4.10. Durabilidad de la mezcla asfáltica**

La durabilidad de un pavimento es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

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

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

Una graduación densa de agregado firme, duro, a la separación, contribuye, de tres maneras, a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas del agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos como la cal hidratada.

La intrusión del aire y agua en el pavimento puede minimizarse si se diseña y compacta la mezcla para darla al pavimento al máximo impermeabilidad posible. Existen muchas causas y efectos con una poca durabilidad del pavimento.

Tabla N° 2.9. Causas y efectos de una poca durabilidad

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

Fuente: Principios de Construcción de mezcla asfáltica en caliente, MS 22, instituto de asfalto

#### **2.4.11. Impermeabilidad de la mezcla asfáltica**

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relaciona con impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es muy importante que su cantidad.

El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.



Tabla N° 2.10. Causas y efectos de la permeabilidad

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

Fuente: Principios de Construcción de mezcla asfáltica en caliente, MS 22, instituto de asfalto

#### 2.4.12. Trabajabilidad de la mezcla asfáltica

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

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

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

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

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Usualmente son el producto de una falta de relleno mineral, demasiada

arena de tamaño mediano., partículas lisas y redondeadas de agregado, y/o demasiada humedad en la mezcla.

Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, si tienen algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad el asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

Tabla N° 2.11. Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad

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

Fuente: Principios de Construcción de mezcla asfáltica en caliente, MS 22, instituto de asfalto

#### 2.4.13. Flexibilidad de la mezcla asfáltica

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

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

#### 2.4.14. Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto

considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento. (El periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

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

Tabla N° 2.12. Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga

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

Fuente: Principios de Construcción de mezcla asfáltica en caliente, MS 22, instituto de asfalto

#### 2.4.15. Resistencia al deslizamiento

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

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado

de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5 mm (3/8") a 12.5 mm (1/2"). Además de tener una superficie áspera, el agregado debe resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimiento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

Tabla N° 2.13. Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento

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

Fuente: Principios de Construcción de mezcla asfáltica en caliente, MS 22, instituto de asfalto

## 2.5 DISEÑO DE MARSHALL DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

### 2.5.1. Descripción

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 desarrolló 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") o menor. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente.

Procedimiento general a seguir en el diseño Marshall de mezclas, el procedimiento completo y detallado que deber ser seguido se encuentra en la norma ASTM D 1559 y AASHTO T 245.

### **2.5.2 Preparación para efectuar los procedimientos Marshall**

Hay diferentes agregados y asfaltos presenta diferentes características, que tienen el impacto directo sobre la naturaleza misma del pavimento. El primer paso en el método de diseño, entonces, es determinar las cualidades que se necesita en una determinada mezcla asfáltica, y posteriormente selecciona el tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que pueda combinarse para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

### **2.5.3 Selección de las muestras de material**

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras de asfalto y del agregado que va a ser usados en las mezclas de pavimentación. Es importante que la muestra de asfalto tenga características idénticas a las del asfalto que ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras del agregado. La razón simple, los datos de los procedimientos de diseño de la mezcla determinan la “receta” para la elaboración de la mezcla final usada en el proceso de pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en laboratorio tienen características idénticas a los usados en el producto final.

### **2.5.4 Preparación del agregado**

La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va ser usado debe ser ya conocida con el propósito de establecer la temperatura de mezclado y compactación de laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar claramente con características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinando su peso específico y efectuar su análisis granulométrico.

Con la finalidad de preparar una serie de briquetas que tengan diferentes contenidos de asfaltos, se prepara una dosificación por el método de tanteo, en función de una faja de

trabajo que se adecue al proyecto, y de una granulometría conocía de los agregados disponibles (grava 3/4", grava 3/8" y arena natural).

Como indica el nombre de método, se tantea con diferentes porcentajes de agregados hasta que se encuentre una combinación que se adecue de mejor manera posible a la faja de trabajo.

Sabiendo que tienen que elaborar briquetas con un peso de 1200 gr. Se determina el contenido de asfalto en peso equivalente a un porcentaje del peso total de la briketa.

Conociendo el peso del agregado que tiene que ocupar cada briketa por la diferencia en peso entre el total de la briketa y el peso del asfalto, se separa una dosificación en pesos retenidos, que apoya cada tamiz.

Se prepara un número determinado de muestras de agregados, por contenido de asfalto, para elaborar un punto en la curva de dosificación Marshall, y se separará cada uno en platos correctamente identificadas.

Importante mencionar que, para la elaboración del método convencional de mezclas asfáltica en caliente, el agregado tiene que estar seco para tal fin, antes de efectuar el pesado se deja el material al horno a 110 °C durante 24 horas.

### **2.5.5 Preparación de las muestras de ensayo**

Las briquetas de ensayo de las posibles mezclas asfálticas son preparados haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto, como se mencionó anteriormente. El margen de contenidos de asfalto usando en las briquetas de ensayo está determinado con la base de 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 esta formulada por los resultados de análisis granulométrico.

Las muestras del agregado son preparadas de la siguiente manera:

El asfalto y agregado se calienta y se mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas, esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurre en planta.

La mezcla asfáltica calientes se colocan moldes pre calentados.

Como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no se enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.

Las briquetas son compactadas mediante golpes del matillo Marshall de compactación. El número de golpes de martillo son de 35, 50 y 75 golpes depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así una probeta Marshall de 35 golpes realmente recibe 70 golpes. Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos.

Después de compactar las briquetas se enfrían y extraídas de los moldes.

### **2.5.6 Especificaciones de Marshall**

El método Marshall usa muestras de ensayo (probetas) de 64 mm. (2.5”) de espesor por 102 mm. (4”) 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 N° 2.14 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

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 N° 2.14. Graduaciones propuestas para mezclas cerradas

Abertura de malla	Tamaño máximo nominal del agregado								
	2 pulg. (50.00 mm.)	1 ½ pulg. (37.50 mm.)	1 pulg. (25.00 mm.)	¾ pulg. (19.00 mm.)	½ pulg. (12.50 mm.)	3/8 pulg. (9.50 mm.)	N ° 4 (4.75 mm.)	N ° 8 (2.36 mm.)	N ° 16 (1.18 mm.)
2 ½ " (63.0 mm.)	100-100	-	-	-	-	-	-	-	-
2 " (50.0 mm.)	90-100	100-100	-	-	-	-	-	-	-
1 ½ " (37.5 mm.)	-	90-100	100-100	-	-	-	-	-	-
1 " (25.0 mm.)	60-80	-	90-100	100-100	-	-	-	-	-
¾ " (19.0 mm.)	-	56-80	-	90-100	100-100	-	-	-	-
1/2 " (12.5 mm.)	35-65	-	56-80	-	90-100	100-100	-	-	-
3/8 " (9.5 mm.)	-	-	-	56-80	-	90-100	100-100	-	-
N ° 4 (4.75 mm.)	17-47	23-53	29-53	35-65	44-74	55-85	80-100	-	100-100
N ° 8 (2.36 mm.)	13-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	65-10	-	95-100
N ° 16 (1.18 mm.)	-	-	-	-	-	-	40-80	-	85-100
N ° 30 (600 µm.)	-	-	-	-	-	-	35-65	-	70-95
N ° 50 (300 µm.)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	-	45-75
N ° 100 (150 µm.)	-	-	-	-	-	-	3-20	-	20-40
N ° 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	3-9	3-9	4-10	4-11	5-12	6-12	7-12	8-12

Fuente: ASTM D 3515 Programa de carretera estratégica SHRP A-369, 1994



Tabla N° 2.15. 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) (lbf)	336 (756)	-	5358 (1200)	-	8006 (1800)	-
Flujo, 0.25mm (0.01")	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% VMA	Ver Tabla N° 2.16					
% VFA	70	80	65	78	65	75

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, MS 22, instituto de asfalto

## NOTAS

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> 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

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

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

<sup>5</sup> 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.

Los valores recomendados para el V.A.M. de acuerdo al tamaño de las partículas se indica en la siguiente tabla.

Valores recomendados por los V.A.M.

Tabla N° 2.16. Mínimo porcentajes de vacíos de agregado mineral VAM

Tamaño máximo		VAM mínimo, por ciento (%)		
		Vacíos de diseño, por ciento (%)		
(mm)	(")	3	4	5
1.18	N° 16	21.50	22.50	23.50
2.36	N° 8	19.00	20.00	21.00
4.75	N° 4	16.00	17.00	18.00
9.50	3/8"	14.00	15.00	16.00
12.50	1/2"	13.00	14.00	15.00
19.00	3/4"	12.00	13.00	14.00
25.00	1.00	11.00	12.00	13.00
37.50	1.50	10.00	11.00	12.00
50.00	2.00	9.50	10.50	11.50
63.00	2.50	9.00	10.00	11.00

Fuente: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, MS 22, instituto de asfalto

## NOTAS

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

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

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

### **2.5.7 Análisis de los resultados del ensayo Marshall gráficos de los resultados**

Los técnicos de laboratorio trazan resultados del ensayo de Marshall en gráficas para poder entender las características particulares de cada briqueta usada en la serie. Mediante el estudio de las gráficas, puede determinar cuál briqueta, de la serie cumple mejor los criterios establecidos para el pavimento determinado. Las proporciones de asfalto y agregado en esta briqueta se convierten en las proporciones usadas en la mezcla final.

Usualmente representa gráficas de los porcentajes vacíos, de los porcentajes de vacíos en el agregado mineral, los porcentajes de vacíos llenos de asfalto, los pesos unitarios, los valores de estabilidad Marshall y los valores de fluencia Marshall.

### **Relaciones y observaciones de los ensayos**

Los resultados de los ensayos se trazan las gráficas, usualmente revelan ciertas tendencias en las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades de las mezclas. A continuación, se enuncian ciertas tendencias que pueden observarse al estudiar las gráficas, estas tendencias son simplemente sugerencia y parámetros de una mezcla convencional que no tienen como finalidad definir los resultados de un ensayo aleatorio.

- El porcentaje de vacíos disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego con aumentos en el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos llenos de asfalto aumenta, esto debido con los aumentos en el contenido de asfaltos
- La curva para el peso unitario (densidad) de la mezcla es similar a la curva de estabilidad, excepto que el peso unitario máximo se presenta a un contenido de asfalto ligeramente mayor que el que determina la máxima estabilidad.

- Hasta cierto punto, los valores de estabilidad aumentando a media que el contenido de asfalto aumenta. Más allá de este punto, la estabilidad disminuye con cualquier aumento en el contenido de asfalto.

### **Verificación de los criterios de diseño**

Usando los datos anteriores, podemos seleccionar una muestra cuyo contenido de vacíos este dentro de los parámetros de diseño, correspondiente a esto se tendrá un contenido específico de asfalto para la mezcla, parámetro principal por el cual se clasificará. Los valores de las otras propiedades de las mezclas son luego revisados para garantizar que cumple todos los criterios de diseño Marshall.

### **Selección de un diseño de mezcla**

El diseño de mezcla seleccionado, generalmente aquel que cumple, de manera más económica, con todos los criterios establecidos, sin embargo, no se deberá diseñar una mezcla para optimizar una propiedad en particular. Por ejemplo, las mezclas de valores muy altos de estabilidad son con frecuencia, poco deseables, debido a que los pavimentos flexibles que contiene este tipo de mezclas con esta característica tiende a ser menos durables y pueden agrietarse prematuramente bajo volúmenes grandes de tránsito. Cualquier variación en los criterios de diseño deberá ser permitida solo bajo circunstancias poco usuales, a no ser que el comportamiento en servicio de una mezcla en particular indique que dicha mezcla alternativa es satisfactoria

## **2.6 MODIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

En el mundo la tecnología de los asfaltos modificados ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales cuando experimentan niveles elevados de tránsito y gradientes de temperatura. Por lo general lo que se busca con este tipo de tecnología es mejorar algunas de las propiedades mecánicas y reológicas de los asfaltos y las mezclas asfálticas convencionales tales como la susceptibilidad térmica, la rigidez y la resistencia al envejecimiento, a las deformaciones plásticas y a la fatiga. Para modificar dichas propiedades, la tendencia actual es adicionar al asfalto (vía húmeda) o a la mezcla

asfáltica (vía seca) aditivos poliméricos productos de desechos industriales con el fin de mitigar el impacto ambiental que éstos producen.

Los asfaltos modificados son el producto de la disolución o incorporación de un aditivo modificador (polímero o no polímero), que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades como: susceptibilidad a la temperatura, intervalo de plasticidad, cohesión, respuesta elástica, resistencia al agua y al envejecimiento.

Los modificadores aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos como la fatiga; reducen el agrietamiento, la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de la temperatura. Estos modificadores son adicionados al asfalto antes de mezclarlos con el material pétreo. (Heshmat, 1997).

Los ligantes asfálticos tradicionales tienen limitaciones en su respuesta a las cargas que día a día aumentan su frecuencia y su intensidad, sin olvidar la acción del clima que en muchos proyectos han generado ondulamientos y agrietamientos prematuros. En consecuencia, es necesario buscar y desarrollar materiales más resistentes que alarguen el periodo de servicio y disminuyan los gastos de conservación. Los ligantes modificados han demostrado capacidad para mejorar el comportamiento de los tradicionales, dando la oportunidad de adecuarlos a unas condiciones específicas de respuesta en los proyectos. (Arenas Lozano, H. L., 2011).

Para la evaluación del comportamiento de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas se realizarán ensayos Marshall, módulo dinámico y deformación permanente. Para el cemento asfáltico (CA) con y sin aditivo se realizarán ensayos de caracterización de asfaltos como penetración, punto de ablandamiento y viscosidad.

Un número de factores que incluyen el clima y la carga de tráfico influyen en el rendimiento de pavimento flexible. Hay una necesidad urgente de contar con la especificación basada en el desempeño y el uso de innovadores materiales de alto rendimiento para la construcción de pavimentos bituminosos. Al mejorar la resistencia y

durabilidad de las mezclas, la reducción del espesor de la capa y el aumento de la vida media puede ser conseguida.

Los principales objetivos que se encuentran dentro de diferentes proyectos de investigación con mezclas asfálticas modificadas se han concentrado en medir:

Deformación permanente (ahuellamiento).

Desgaste (cántabro).

Resistencia (estabilidad Marshall).

Envejecimiento.

Comportamiento térmico.

Fatiga.

Adherencia.

Costos de la mezcla convencional vs. la modificada (economía).

Beneficios ambientales.

La influencia de adicionar nuevos materiales al asfalto.

Las bibliografías indican que para diferentes materiales con los que se modifica una mezcla asfáltica se tiene que ver la parte técnica-económica por lo cual los materiales que se adiciona son de porcentajes bajos. De los cuales se mencionan algunos:

➤ Mezclas asfálticas modificadas con látex natural

Presentan un aumento de la estabilidad en un 29 % con respecto a la mezcla convencional en el porcentaje óptimo de asfalto y aditivo. Este tipo de mezcla muestra una tendencia a mejorar las propiedades de peso unitario y porcentaje de vacíos a medida que se adiciona el látex al asfalto. Con porcentajes a usar en la mezcla de 1 % a 7 % de látex natural.

➤ Fibras de poliéster

Cuando se adicionan estas fibras se produce una disminución de la estabilidad en las mezclas, debido a que la fibra no presenta resistencia significativa a cargas de compresión. Se observa además un ligero aumento del peso unitario con la adición de las fibras. Contrario a la estabilidad, adicionar poliéster a las mezclas produce un aumento del 139 % de la resistencia última en el ensayo de tracción indirecta, con un contenido de fibras de 0.5 % a 2 %.

➤ Caucho GCR

En mezclas drenantes producen una disminución del porcentaje óptimo de asfalto de 5.1 % (asfalto convencional) a un 4.6 % (asfalto modificado). Además, eleva la estabilidad en un 25 %, sin presentar diferencias considerables en las otras propiedades. Se puede afirmar que la adición de caucho mediante el proceso por vía húmeda permite mejorar la resistencia a las cargas producidas por el tráfico, utilizando una menor proporción de ligante. Adicionar desperdicios elastoméricos a una mezcla asfáltica produce un aumento de la estabilidad y densidad. Este porcentaje varía entre 1 % y 15 %.

➤ Desecho de PVC

(En porcentajes de 0.5, 1.0 y 1.5 % con respecto al peso de las briquetas) al asfalto con el fin de modificar mezclas drenantes, se genera una pérdida por desgaste Cántabro mayor que cuando se utiliza mezcla convencional. Los autores tienen como hipótesis que adiciones menores de desecho de PVC mejorarían el comportamiento de las mezclas drenantes.

➤ Fibras metálicas, limadura de acero

Cuando se adiciona fibras o limadura de acero a la mezcla asfáltica se reduce la deformación permanente aproximadamente entre un 15 y 25 % cuando se compactan las briquetas a 50 golpes y esta disminución está entre 20 y 30 % cuando se compactan a 75 golpes. Se observa además un aumento de la resistencia hasta un 100 % en el ensayo de tracción indirecta y de la estabilidad, hasta un 40 %, con un contenido de fibras o limadura de 1 % a 20 %.

## **2.7 GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL DEPARTAMENTO DE TARIJA**

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.

### **2.7.1. Generación de residuos en Bolivia**

De acuerdo a datos del INE, para el año 2010, se estima una población total de 10426155.0 habitantes, de los cuales el 69.7 % de la población corresponde al área urbana y el 30.3 % al área rural, siendo que aproximadamente el 77.0 % de la población urbana se concentra en las ciudades capitales de departamento y ciudades mayores, y el 23.0 % en los municipios intermedios y menores.

En nuestro país, cerca de los 2 millones de toneladas de basura que se generan, el 90.0 % son depositadas en botaderos a cielo abierto. El 37.0 % 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 100.0 % 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 70.0 % de desechos que sean depositados en los rellenos sanitarios.

Gráfico N° 2.1. Sitios de disposición final en Bolivia



Fuente: Diagnostico de la gestión de residuos sólidos en Bolivia, 2010

### 2.7.1.1. 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, llantas, etc. (Corz C. , 2015)

### 2.7.2. Generación de residuos en departamento de Tarija

La ciudad de Tarija genera un promedio de 120 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 39.745 toneladas de basura por semana.

Tabla N° 2.17. Cantidad y cobertura en peso de residuos sólidos recolectado por semana y por año

Tarija, cantidad y cobertura en peso de residuos sólidos recolectados por semana y por año					
N°	Municipio	Categoría poblacional	Residuos recolectados (ton/semanal)	Residuos recolectados (Ton/año)	Cobertura zonas urbanas (%)
1	Tarija	Capital	762.23	39.745	91 %
2	Bermejo	Intermedio	1.44	75	14 %
3	Padcaya	Menor	81.00	4.224	75 %
4	Yacuiba	Mayor	280.00	14.600	62 %
5	Caraparí	Menor	6.35	331	75 %
6	Villamontes	Intermedio	66.00	3.441	80 %
7	San Lorenzo	Menor	9.60	501	83 %
8	Entre Ríos	Menor	2.80	146	33 %
9	El Puente	Menor	3.15	164	61 %
Total			1212.57	63.22	

Fuente: Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en el departamento de Tarija, 2010.

Tabla N° 2.18. Composición física de los residuos sólidos

Tarija, composición física de los residuos sólidos								
Municipio	Categoría Poblacional	Materia Orgánica	Plásticos	Papel y cartón	Metales	Vidrio	Otros	Total
Tarija	Capital	61 %	6 %	6 %	2 %	2 %	23 %	100 %
Villamontes	Intermedio	56 %	9 %	9 %	2 %	---	24 %	100 %

Fuente: Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en el departamento de Tarija/2010

Tabla N° 2.19. Promedios ponderados de PPC por categoría poblacional

Tarija, promedios ponderados de PPC por categoría poblacional	
Categoría poblacional	PPC Promedio (kg/Habitante-día)
Capital	0.52
Mayor	0.47
Intermedio	0.47
Menor	0.31
Promedio	0.49

Fuente: Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en el departamento de Tarija/2010.

Asumiendo, para el resto de los municipios los promedios ponderados de PPC, se estima que la generación total del departamento es 248 ton/día, que representa el 5 % de la generación total del país. Del total generado, el 88% equivalente a 219 ton/día corresponde al área urbana y el 12 % equivalente a 29 ton/día corresponde al área rural.

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.

Tabla N° 2.20. Potencial de residuos sólidos aprovechables en los municipios analizados en ton/día

Tarija, potencial de residuos sólidos aprovechables en los municipios analizados en 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
Yacuibá	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
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)

### 2.7.2.1. 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 N° 2.21. Municipios que cuentan con reglamentos y ordenanzas municipales relacionadas al manejo de residuos sólidos

Tarija, municipios que cuentan con reglamentos y ordenanzas municipales relacionadas al manejo de residuos sólidos			
N°	Municipio	N° 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: Elaboración propia con base a información proporcionada por las EMAT

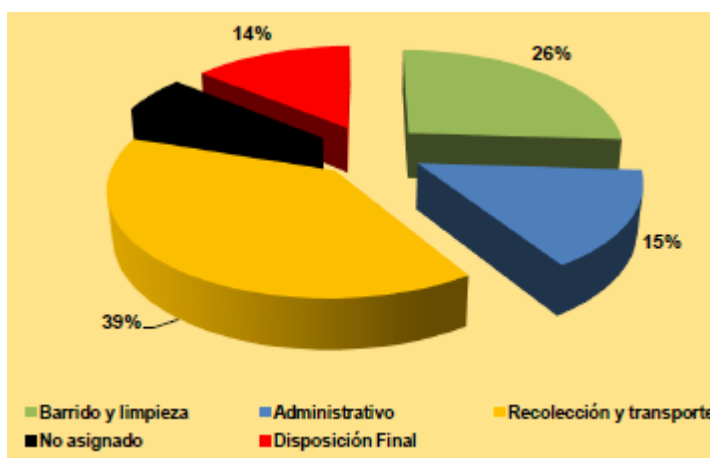
A pesar de ello, en el departamento de Tarija paulatinamente se crean programas y proyectos en cuanto a una buena gestión de residuos. El objetivo de éstos es educar y hacer el aprovechamiento de los residuos en los domicilios, efectuando la recolección selectiva en origen, con el consiguiente aprovechamiento,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

### 2.7.2.2 Presupuesto e Ingresos por la prestación de los servicios de aseo urbano

Del total de municipios analizados, en su mayoría, el presupuesto asignado a la prestación del servicio, es global; no responde a una estructura de costos definida y varía en función al tamaño poblacional y peculiaridades de los municipios.

En Tarija, el presupuesto asignado asciende alrededor de Bs.- 10600000.0 En Bermejo fue de Bs.- 400000.0 y en Entre Ríos de Bs.- 190800.0 estos valores se aproximan a la media nacional asignada para ciudades capitales, intermedias y menores.

Gráfico N° 2.2. Estructura presupuestaria de gastos en la gestión y prestación del servicio de aseo en la ciudad de Tarija



Fuente: con base a información proporcionada por EMAT

### 2.7.2.3 Costos del servicio de barrido y limpieza

De los 8 municipios que cuentan con este servicio, en 4 se cuenta con esta información. A excepción de Tarija, en el resto de los municipios, los datos proporcionados son parciales, sin embargo, permiten apreciar el comportamiento y semejanza de los mismos frente a otros municipios de similar población y categoría poblacional.

Tabla N° 2.22. Presupuesto e ingresos por la prestación de los servicios de aseo

<b>Tarija, presupuesto e ingresos por la prestación de los servicios de aseo</b>					
N°	Municipio	Cobra por servicio	Presupuesto ejecutado 2008	Ingresos 2008	Presupuesto aprobado 2009/2010
1	Tarija	Si	7656322.0	7426368.0	10662111.0
2	Padcaya	No	50000.0	0	61000.0
3	Bermejo	Si	400000.0	311517.0	770000.0
4	Yacuiba	No	Sin Dato	0	Sin Dato
5	Caraparí	No	161407.0	0	237407.0
6	Villamontes	No	Sin Dato	0	Sin Dato
7	Villa San Lorenzo	No	66090.0	0	65000.0
8	El Puente	No	65000.0	0	120000.0
9	Entre Ríos	Si	224370.0	24270.0	190821.0

Fuente: A partir de datos proporcionados por las Unidades Municipales de Aseo-

Departamento de Tarija

Tabla N° 2.23. Costo mensual del cobro de aseo

Municipio	Costo operativo mensual (Bs)	Costo unitario domicilio (Bs)
Tarija	169.05	24.16

Fuente: EMAT

Según datos proporcionados por EMAT, durante la gestión 2008 el costo mensual promedio fue de Bs.- 169051.0 generando un costo unitario de Bs.- 24.16.

## **2.8 FIBRA METÁLICA DE NEUMÁTICA FUERA DE USO**

### **2.8.1 Justificación del reciclaje de fibra metálica de neumático fuera de uso**

Como se sabe, el desarrollo ha cambiado las condiciones ambientales de tierra, produciendo entre otras cosas una masa amplia y a menudo incontrolables residuos sólidos. La protección del medio ambiente es por ahora un tema social con responsabilidades.

El neumático usado es uno de los graves problemas a resolver, ya que es un material difícil de tratar, en particular por sus características elastómeras que son difíciles de recuperar si no se adoptan procesos de trabajo adecuados.

La llanta esta principalmente de caucho y otros componentes, esta se demora en degradarse más de 500 millones de años, por los que nos obliga a nosotros como seres

humanos, quienes son los principales beneficiarios de este producto, a buscar métodos de reutilización, para poder aprovechar este recurso y evitar más contaminación. Otra repercusión inadecuado desecho de estos elementos es que las personas que compran las llantas usadas por el comercio de reencauche, pero hay quien espera evitar acumulación de esta basura prefieren quemarlas, con lo cual polucionan el aire.

Este proyecto de investigación particulariza el aprovechamiento del reciclado de los neumáticos fuera de uso, utilizando los alambres de ceja de la llanta para adicionar a la mezcla asfáltica.

En la ciudad de Tarija, Bolivia el reciclaje de este material metálico está relegado debido a principalmente a su nivel de demanda, y en cierto modo, aunque aún nivel bajo la dificultad de su extracción ya que se necesita de un extractor mecánico para separarlos del conjunto de caucho de elastómero, a pesar de esto en la ciudad de Cochabamba, Bolivia se realiza este proceso.

Según datos INE para el año 2010 se recolecta 39745.0 ton/año de residuo sólido en la ciudad de Tarija, relleno sanitario de la ciudad de Tarija a 8 km del centro de la ciudad, en la zona de Pampa Galana, y el costo de recolección por año en la ciudad de Tarija es de 10662111.0 Bs/año, y el 2.75 % del total de material sólido es residuo metálico que es aprovechable, es decir que se recolecta un 1092.99 ton/año con un costo de 293208.05 Bs/año con un costo de 0.27 Bs/kg la recolección en la ciudad de Tarija de materiales metálicos.

Uno de los procesos más seguros y no contaminantes para la reutilización de los elementos de llanta reciclado es la extracción mecánica que permite obtener el material de fibra metálica como materia prima, por ser un proceso puramente mecánico los productos resultantes son de alta calidad, limpios de todo tipo de impurezas, lo que facilita la utilización de estos materiales en nuevos procesos y aplicaciones, ayudando de manera al medio ambiente de:

- Recuperación de materias primas: trozos y granulados de goma, polvillo de carbón, negro de humo, fibras metálicas (alambre), telas y telas pulverizadas.

- Eliminación de un desecho no biodegradable y no compactable de difícil manipulación y de compleja disposición final, ya que es común que los neumáticos vuelvan a aparecer en la superficie de luego enterrarlos
- Reducción de la contaminación de cursos de agua, calles caminos, terrenos baldíos y campos.
- Reducción de la posibilidad de que se produzcan incendios con la siguiente contaminación de aire, suelo y cursos de agua si los hubiere.
- Reducción de la posibilidad de agua estancada, evitando la proliferación de insectos transmisores de distintas enfermedades.
- Ahorro en la extracción de piedras y otros materiales inertes de la cantera y ríos, para la construcción de capas asfálticas
- Mejoramiento en el precio y calidad de los asfaltos.

Imagen N° 2.1. Relleno sanitario de la ciudad de Tarija



Fuente: Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en Bolivia, 2010

### **2.8.2 Descripción**

La fibra metálica de neumático se encuentra presentes en todos los neumáticos específicamente en el área del talón, estos en realidad forman un aro de alambres recubiertos de cobre para evitar la corrosión de los mismos debido a la humedad y separados entre por caucho, su función es unir el conjunto en sí de la llanta



Imagen N° 2.2. Corte transversal del neumático en des uso



Fuente: Elaboración propia

### **2.8.3 Composición y características de los alambres de los neumáticos**

#### **2.8.3.1 Composición del alambre de neumáticos**

A continuación, describe las composiciones de los alambres de ceja para llantas o neumáticos (Emcocables, 2014)

#### **Masa de bronce**

Existe dos clases de alambre, cuales se clasifican así:

Normal 0.3 a 0.7 (gr. bronce / kg de alambre)

Alta resistencia 0.6 a 1.0 (gr. bronce / kg de alambre)

#### **Dimensión y tolerancia**

Diámetro 0.94 mm.

Tolerancia +0.05

Redondez 0.03 mm.

#### **Adherencia del alambre bronceado de caucho**

Normal tipo 1: 334 (gr. bronce /kg de alambre)

Normal tipo 2: 380 (gr. bronce / kg de alambre)

Alta resistencia:535 (gr. bronce / kg de alambre)

Figura N° 2.4. Alambres de llanta durante su producción



Fuente: Emcocables, 2014

### **2.8.3.2 Características del alambre para ceja de neumático**

Si se mira la sección de una llanta, se puede apreciar que, en el interior de cada llanta, hay un atado de alambres de acero bañado en bronce. Sus características son las siguientes:

#### **Acabado**

El alambre debe presentar un terminado brillante y libre de contaminación, corrosivo, defectos superficiales y su color debe ser uniforme en toda su longitud.

#### **Soldadura (uniones)**

El número de soldaduras permisibles en el alambre debe tener un máximo de 2 por bobina. Estas se hacen antes del bronceado y den quedar lisas y uniformes, de manera que no aumenten el diámetro de alambre.

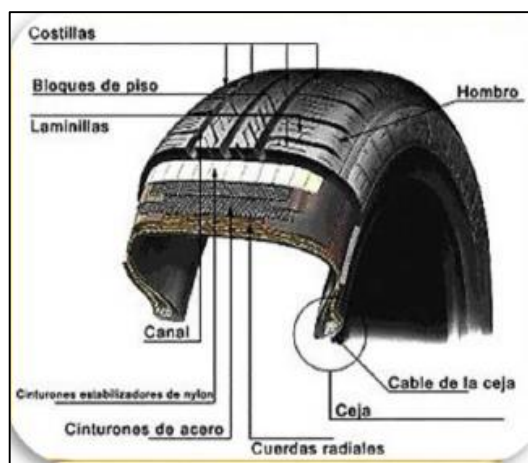
#### **Resina protectora (antioxidante)**

El alambre debe tener un revestimiento de resina de 0.1 gr. /kg de alambre, para mejorar la resistencia a la corrosión.

## Adhesión

La propiedad de adhesión del alambre depende de las características intrínsecas de los diferentes compuestos utilizados, por lo que la especificación debe fijarse entre fabricante y consumidor.

Figura N° 2.5. Estructura de una llanta



Fuente: Llantas algosa completo, 2014

### 2.8.4 Maquinaria de extracción y separación de alambre de neumático fuera de uso Destalonadora o descejadora

Esta máquina se utiliza para extraer el anillo de alambres de acero que se encuentra en el interior (en el talón) de la llanta de un camión. Cada llanta cuenta con dos anillos, los cuales, sino son extraídos, pueden comprometer seriamente de la eficiencia de las fases sucesivas de la línea. Debido a la dureza del alambre de acero.

El proceso de destalonamiento es esencial en la obtención de los alambres de acero, ya que al extraer el alambre de talón antes de triturar la llanta permite que el producto final sea más limpio y haya menos desgaste en las pares de la trituradora que están movimiento.

Figura N° 2.6. Destalonadora



Fuente: Vivo en Italia, 2009

### **Trituradora primaria**

Esta máquina se encarga de la primera trituración de la llanta, por lo general este tipo de máquinas cuentan con transmisión hidráulica y con mínimo dos ejes en los cuales se encuentran las cuchillas de corte. El resultado dicha operación son grandes trozos de llantas de tamaño no uniforme.

Figura N° 2.7. Trituradora primaria



Fuente: Vivo en Italia, 2009

### **Trituradora secundaria**

La trituración de secundaria la realiza otra máquina trituradora la cual reduce los trozos de llantas provenientes de la primera fase, en pedazos aún más pequeños, motivos por cual este tipo de máquina debe contar con una parrilla o red metálica para la calibración del tamaño del material en la salida

Figura N° 2.8. Trituradora secundaria



Fuente: Vivo en Italia, 2009

### **Granulador primario**

El granulador o molino granulador es la máquina que se encarga de granular los pedazos de llantas provenientes del triturador secundario, la dimensión de los granos que se logra obtener con el granulador es de 16 mm.

Figura N° 2.9. Granulador primario



Fuente: Vivo en Italia, 2009

### **Separación del acero “Armónico” (desmetalizado)**

Esta operación separa el 99 % del acero armónico presente en las llantas, el acero es removido por medio de un separador magnético el cual cuenta con una banda transportadora que se ocupa de conducir el metal hacia un punto de recolección

Figura N° 2.10. Separador magnético



Fuente: Vivo en Italia, 2009

### **Granulador secundario (refinación y selección del grano)**

Si el material granulado (granos de tamaño 0-20 mm) no contiene material textil. Este es conducido por medio de una banda transportadora a un cernido rotativo el cual se encarga de seleccionar los granos en diferentes grupos según su tamaño.

En este caso la criba (una especie de tamiz) rotativa es alimentada por un tornillo sin fin, la criba tiene 3 parrillas con 3 diferentes tamaños de orificios con diámetro que van de 1 – 7 mm. Durante el proceso de criba tura, es decir la separación granulométrica, los granos van a caer en diferentes tolvas contenedoras las cuales en su parte inferior tiene enganchados big bags (grandes sacos). De manera durante la caída los granos se depositan en los sacos.

Figura N° 2.11. Granulador secundario



Fuente: Vivo en Italia, 2009

### **2.8.5 Características de la fibra de neumático que ha de tomarse en cuenta para decidir que forme parte de la mezcla asfáltica**

Luego que se describió del proceso de extracción y separación del alambre de neumáticos se explicara algunas ventajas que presenta sus características anteriormente mencionada para ser adicionadas a una mezcla asfáltica estas son:

Alta resistencia a la tracción al igual que alta ductilidad (alargamiento).

Empaquetado especial para proteger contra la corrosión y destinado a prolongar la vida útil.

Mayor adherencia: recubrimiento de resina evita la oxidación.

El cable mantiene su forma recta después de desarrollar y no acumula tensión por torsión.

Resistencia a tracción.



Figura N° 2.12. Alambre de llanta



Fuente: Vivo en Italia, 2009

Imagen N° 2.3. Alambre de llanta cortada manualmente en 1 cm. aprox.



Fuente: Elaboración propia

## **2.9 LIMADURA METÁLICA**

### **2.9.1 Justificación de reciclaje de limadura metálica**

El reciclaje hoy en día se ha vuelto un tema muy difundido y comentado a nivel mundial, la razón principal de este es priorizar el cuidado del medio ambiente el cual se ve afectado a diario debido a la contaminación generada por la población a nivel mundial, de diversas maneras que van desde la producción de desechos en el hogar a la producción de desechos tóxicos y contaminantes a nivel industrial, estos desechos pueden ser diversos materiales los cuales es ausencia de una cultura de reciclaje pasan



de forma parte de los desechos no biodegradables que va a ser depositados finalmente es rellenos sanitarios a cielo abierto, contaminando el suelo.

En el país se está promoviendo el reciclado de desechos metálicos y residuos de aparatos eléctricos, proyectos como el que implementa el ministerio de medio ambiente y agua, a través del programa nacional de para la gestión integral de residuos sólidos y el programa nacional de la gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Bolivia, promoviendo los procesos de recolección, aprovechamiento y disposición fina de estos desechos, que se producen en los hogares e industrias bolivianas.

Respecto a RAEE (residuos aparatos electrónicos y electrodomésticos, EMAT se encuentra arrancando bajo la tutela de actores en el marco del proyecto tri nacional con GIZ y el MMAyA dentro del cal el municipio de Tarija se encuentra considerado a pedido de EMAT, porque manifestaron su interés de trabajar con los residuos metálicos y electrónicos.

EMAT tienen también un área de almacenamiento de pilas y baterías, ahí es donde llegan los celulares, baterías de vehículos.

Realizan una campaña llamada “Cachibache” en la que, pedidos de los barrios, se recogen, heladeras, cocinas, catres, llantas en des uso, etc. Y lo llevan al relleno sanitario.

Se evidencia EMAT tendría la capacidad para implementar una plata de reciclaje RAEE, analizando las condiciones de espacio, maquinaria requerida.

Uno de estos desechos de los que hablamos, anteriormente es el metal, que luego de ser industrializado y utilizado como materia prima de diversos objetos, usados por el hombre, al cumplir con la vida útil en dicho elemento pasa a ser desechado, y si este no es correctamente tratado pasa a formar parte del proceso descrito anteriormente, además de esto la falta de reciclaje de este elemento de lugar a la necesidad de conseguir nueva materia prima.

Para obtener este material el hombre ha recurrido como siempre a la naturaleza, a través de yacimientos los cuales están siendo poco a poco agotados debido a estos se hace

necesaria una inversión mayor en cuanto a su explotación ya que la inversión sube. Además, estos depósitos se encuentran más adentrados en la corteza terrestre haciendo necesarios métodos de explotación más tecnificados y contaminantes por la utilización de maquinarias de la excavación de yacimientos, sin hablar del impacto ambiental que estos producen.

Según datos INE para el año 2010 se recolecta 39,745.0 ton/año de residuo sólido en la ciudad de Tarija, relleno sanitario de la ciudad de Tarija a 8 km del centro de la ciudad, en la zona de Pampa galana, y el costo de recolección por año en la ciudad de Tarija es de 10,662,111.0 Bs/año, y el 2.75 % del total de material sólido es residuo metálico que es aprovechable, es decir que se recolecta un 1,092.99 ton/año con un costo de 293,208.05 Bs/año con un costo de 0.27 Bs/kg la recolección en la ciudad de Tarija de materiales metálicos.

Imagen N° 2.4. Desechos metálicos en metalúrgica

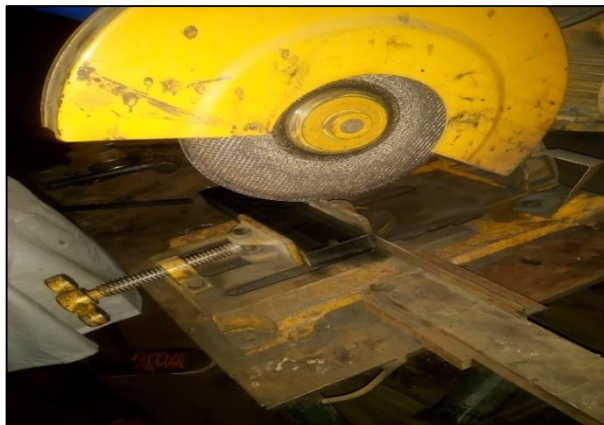


Fuente: Elaboración propia

### **2.9.2 Descripción**

Las limaduras también conocidas como: torneaduras, virutas o esquirlas provenientes del amolado de aserrado, limado y recortes de estampada o de recortes de piezas metálicas, forman parte de la chatarra o desperdicios y desechos de fundición de hierro o acero.

Imagen N° 2.5. Equipo de corte con sierra circular



Fuente: Elaboración propia

Imagen N° 2.6. Limadura metálica reciclada



Fuente: Elaboración propia

### **2.9.3 Composición y características de limadura metálica**

La limadura metálica es material heterogéneo en cuanto a sus componentes, es decir al ser un desecho del corte de acero u otros materiales metálicos, presenta diversos tipos de variante de este material en su composición es decir tenemos desechos como citamos a continuación.

**Aceros:** Es una aleación de hierro con carbono el cual no debe ser superior al 2 % en peso de su composición.

**Cobre:** Es un metal de transición el cual debido a su alta conductividad maleabilidad y ductilidad se ha convertido en la materia prima de los cables eléctricos.

**Bronce:** Es una aleación de cobre con estaño en proporciones no mayores al 20 % fue de uso frecuente en la orfebrería, y en la actualidad su resistencia al roce y a la corrosión del da un gran uso en partes mecánicas y motrices.

**Aluminio:** Es un material ferromagnético, el cual debido a su polivalente modo de uso es utilizado en diversos materiales y elementos con otros metales, se utiliza para la creación de estructuras portantes para fabricar piezas industriales de todo tipo de vehículos y calderería.

**Estaño:** Es un metal maleable resistente a la corrosión, es decir que no se oxida con facilidad usando protector de cobre y del hierro en diversos productos.

Debida a esta presencia de diversos materiales en composición la limadura metálica presenta en general las mismas propiedades y características de los metales como lo son:

**Tenacidad:** Los metales son resistentes a las fuerzas de impactos como los golpes ya que presenta resistencia a fracturarse.

**Apariencia:** Presentan un color opaco o de brillo metálico característico de su traslape entre banda de valencia y de conducción en su estructura electrónica.

**Conducción:** Son buenos conductores del calor masi como también de la electricidad.

**Consistencia:** Son sólidas en condiciones ambientales normales, su punto de fusión es alto, sus fragmentos son duros debido a su tenacidad, y tienen una densidad alta, además también pueden ser dúctiles y maleables.

#### **2.9.4 Proceso del reciclaje**

La limadura metálica al ser un producto de molienda o corte de acero puede encontrarse de diferentes maneras

Si esta requiere ser procesada a partir de chatarra sigue los mismos procesos de reciclaje que el acero ha cumplido su ciclo de vida útil, procediendo a si de la siguiente manera:

Se separa la chatarra en materiales simples y materiales complejos, los materiales simples son aquellos que no requieren ser desarmados o procesados para su clasificación, como pueden ser recipientes metálicos, canecas metálicas, tanques metálicos, etc. El material compuesto en cambio es aquel que debe ser desarmado antes de ser clasificado en forma definitiva como son los equipos y maquinarias obsoletas, este proceso se involucre ciertos tipos que ayudan a desarmar este tipo de chatarra de la cual involucra proceso de corte de acero, produciendo limadura metálica durante el proceso entre equipos tenemos.

Equipo de corte con sierra circular: Se utiliza para cortar de forma manual o mecánica los materiales metálicos desechados ya sea de planta o in situ en las acerías se procede el reciclaje de este tipo de materiales en forma de escorias y polvo de acero.

Equipo de peladoras de cable: Se utiliza para poder extraer el corte y aluminio de los cables obsoletos, separado el cable de su recubrimiento plástico y cortándolo en dimensiones apropiadas.

### **2.9.5 Tipos de materiales reciclados**

El metal reciclado corresponde a diversos tipos de aleaciones hierro ya que provienen diversas fuentes que recogen materiales que han cumplido su ciclo productivo útil, entre los materiales principales tenemos las siguientes

Acero: Presente piezas mecánicas de uso automotriz o industrial, como por ejemplo motores fuera de uso ya sea de automóviles, motes industriales, etc. estas serán tratadas de acuerdo a los procesos de reciclaje mencionados anteriormente, o en su defecto destinado a fundición.

Cobre: Presenta en los cables eléctricos desechados, los cuales por su alta conductividad eléctrica también se encuentra presente en otros elementos que usan esta fuente para su servicio, debiendo ser correctamente separados de su protección aislante de caucho o plástico.

Bronce presente en varias piezas de uso automotriz e industrial las cuales debido a su alta resistencia al desgaste son de uso general aquellos elementos que requieren trabajar a fricción, como lo son los bocines, copas de ensamblaje, topes mecánicos, etc.

La presente investigación se usa un material heterogéneo producto al corte de diversos materiales y su mezcla como material reciclado.

### **2.9.6 Propiedades del material reciclado**

La limadura metálica conserva en gran parte las propiedades de los metales que forman parte de su composición, como la conductividad eléctrica, tenacidad y sus colores grises y brillantes, es decir que la limadura metálica trabajara en la mezcla asfáltica como un relleno férreo que se espera aumente su estabilidad, y dependiendo de los resultados mediante el análisis detallado del resto de las variables conserve o mejores las propiedades de la mezcla original tales como el porcentaje de vacíos de aire el flujo el porcentaje de asfalto absorbido, los cuales además depende de otras variables, como lo son los pesos específicos de agregados, el peso específico de asfalto, densidad máxima teórica, etc.

De esta manera tenemos las siguientes propiedades para este material.

Estado físico: Presenta un estado físico sólido, a temperatura ambiente

Olor: Este material no presenta un olor alguno.

Solubilidad: Material es insoluble al agua

Ebullición: Presenta una temperatura de ebullición a 2782 °C

Fusión: Presenta una temperatura de fusión de 1535 °C

Inhalación: Puede causar posibles irritaciones en tracto respiratorio, tos dificultad respiratorias.

Condición inflamatoria: Este material es ligeramente combustible

Producto de combustión: El agente de combustión presente en este material son los óxidos de hierro

## **2.10 ANÁLISIS DE PRESUPUESTO**

### **2.10.1 Introducción**

un presupuesto es considerado una suposición de valor de un producto para condiciones definidas y en un tiempo determinado.

### **2.10.2 Precios unitarios**

Los precios unitarios están en concordancia con cada proyecto de acuerdo a los siguientes factores.

- Disponibilidad de materiales
- Normas y especificaciones
- Condiciones climatológicas
- Recursos necesarios

### **2.10.3 Elementos de los precios unitarios**

los elementos que componen el precio unitario son

- Costos directos
- Costos indirectos

### **2.10.4 Costos directos**

Los costos directos son aplicables directamente a la obra y derivan en gastos de

- Materiales
- Mano de obra
- Herramientas y equipo
- Beneficios sociales

### **CAPÍTULO III**

## **CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS, CEMENTO ASFÁLTICO, MATERIALES METÁLICOS RECICLADOS**

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se desarrollarán las pruebas de laboratorio necesarias para llevar a cabo el diseño de la mezcla propuesta en el estudio, estas se realizarán a las muestras de material pétreo obtenidos en la comunidad de San José de Charaja, de igual manera se realizará los ensayos de laboratorio de hormigón y asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, por tal motivo se describen dichos ensayos con la respectiva norma que los ampara.

El capítulo está dividido en tres partes: primera constituye la descripción detallada del procedimiento para la caracterización de los materiales pétreos, la segunda parte constituye al análisis del cemento asfáltico y la tercera parte constituye en la caracterización del material reciclado alambre de neumático y limadura metálica.

El procedimiento para el diseño esta propuesto por el manual de carreteras de la ABC.

### **3.2 OBTENCIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS**

El material pétreo, que se obtuvo está situado en la comunidad de San José de Charaja, donde se encuentra ubicada una chancadora para la provisión de material para la Institución de SEDECA de Tarija de la provincia de Cercado.

La planta de agregados pétreos de SEDECA está ubicada sobre la ruta 45, tramo Chocloca -Juntas

Se escogió los siguientes materiales: agregado grueso de 3/4", agregado intermedio de 3/8" y agregado fino.



Imagen N° 3.1. Ubicación de la planta de asfaltos y trituradora de agregados de SEDECA



Fuente: Google earth

**Ubicación geográfica**

Las coordenadas geográficas de la entrada de la planta asfáltica y trituradora de agregados de SEDECA son:

Latitud: 21°46'54.71" S.

Longitud: 64°46'09.95" O.

Zona: 20

Imagen N° 3.2. Planta de agregados pétreos de SEDECA lugar San José de Charaja



Fuente: Elaboración propia

### **3.2.1. Justificación de selección de agregados pétreos**

El diseño de una mezcla asfáltica debe garantizar un comportamiento adecuado en calidad y gradación de los agregados pétreos por lo que tienen un gran efecto en las propiedades de la mezcla asfálticas, la selección apropiada del agregado pétreo depende esencialmente del propósito de su aplicación.

- Se selecciona el tipo de granulometría de mezcla que mejor se adapte a los requerimientos planteados, considerando los efectos económicos y de puesta en obra.
- Los agregados pétreos se deben seleccionar identificando el tipo mezcla asfáltica, por diferentes fracciones de agregado pétreo, por su proporción de vacíos de aire en la mezcla asfáltica, por el tamaño máximo del agregado pétreo, por la estructura del agregado pétreo, por su granulometría y por la categoría de tráfico.
- Se selecciona los materiales pétreos, controlando su calidad y gradación obtenida en ensayos de laboratorio indicando los niveles recomendables de su uso en mezclas asfálticas.
- Se realiza la dosificación y se determina el contenido óptimo del ligante según un proceso que debe adaptarse al tipo de mezcla asfáltica, la cual debe hacerse para distintas combinaciones de fracciones disponibles del agregado pétreo, de manera que la granulometría utilizada se entre dentro de la franja granulométrica de diseño.

## **3.3 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS**

Los ensayos de caracterización de los agregados pétreos fueron realizados en el laboratorio de hormigón de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, donde se realizaron los ensayos de granulometría, peso específico, peso unitario, caras fracturadas, desgaste de los Ángeles y equivalente de arena.

Nota: Los procedimientos de los ensayos realizados se mostrará en ANEXOS 1.

### **3.3.1 Granulometría (ASTM C-136)**

El ensayo cubre la determinación de la distribución de partículas de agregado fino y gruesos mediante cribado.

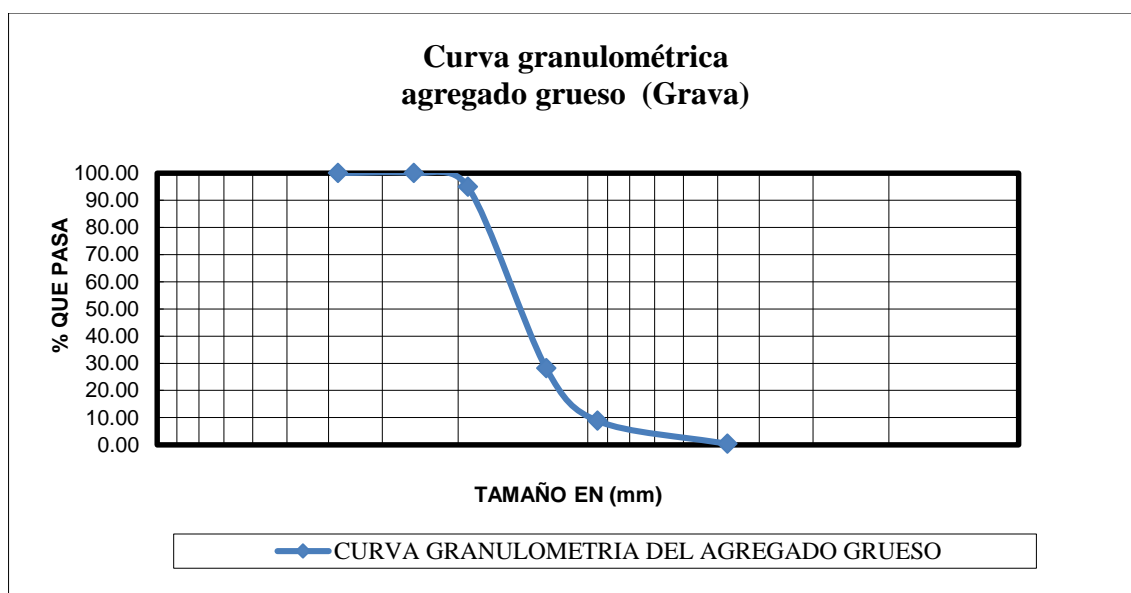
## Resultados obtenidos

Tabla N° 3.1. Curva granulométrica de agregado grueso 3/4"

Peso total (gr.)			3000		
Tamices	Tamaño (mm.)	Peso ret.	Ret. acum	% Ret	% que pasa
1 1/2"	38.1	0	0	0.00	100.00
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	150.70	150.70	5.02	94.98
1/2"	12.5	2002.60	2153.30	71.78	28.22
3/8"	9.50	581.90	2735.20	91.17	8.83
N° 4	4.75	254.60	2989.80	99.66	0.34
N° 8	2.36	0.16	2989.96	99.67	0.33
N° 16	1.18	0.33	2990.29	99.68	0.32
N° 30	0.60	1.77	2992.06	99.74	0.26
N° 50	0.30	0.50	2992.56	99.75	0.25
N° 100	0.15	0.00	2992.56	99.75	0.25
N° 200	0.08	0.00	2992.56	99.75	0.25
Base	-	2.70	2992.50	99.75	0.25
<b>Suma</b>		2995.26			
<b>Pérdidas</b>		4.74			
<b>MF =</b>		9.66			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 3.1. Curva granulométrica de agregado grueso 3/4"



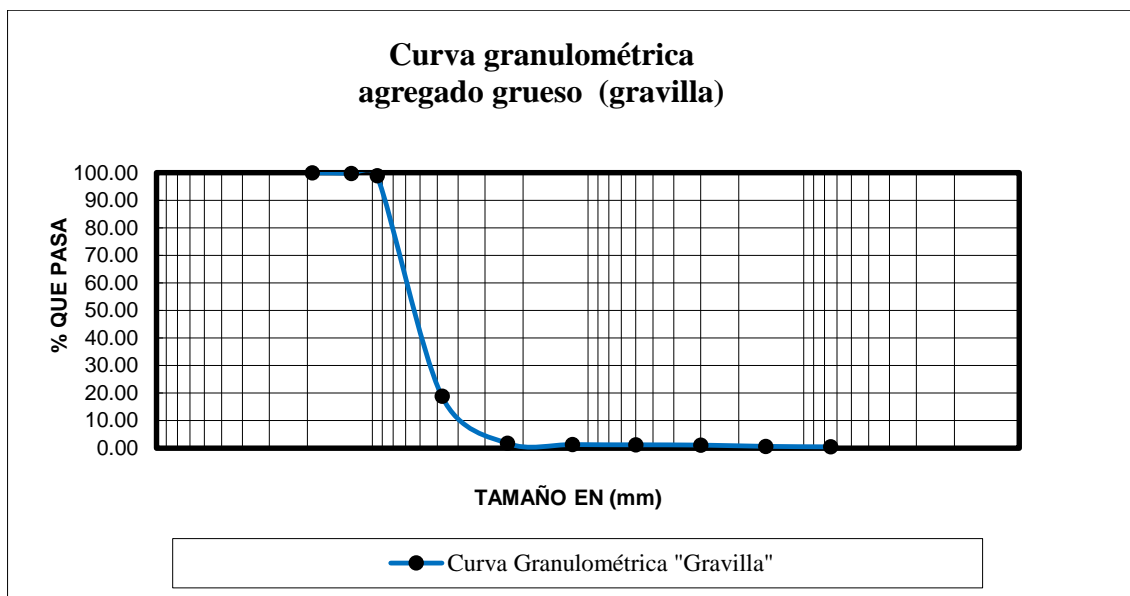
Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 3.2. Curva granulométrica de gravilla 3/8"

Peso total (gr.)			3000		
Tamices	Tamaño (mm.)	Peso ret.	Ret. acum	% Ret	% que pasa
3/4"	19.0	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
1/2"	12.5	7.30	7.30	0.24	<b>99.76</b>
3/8"	9.50	24.20	31.50	1.05	<b>98.95</b>
N° 4	4.75	2403.20	2434.70	81.16	<b>18.84</b>
N° 8	2.36	513.00	2947.70	98.26	<b>1.74</b>
N° 16	1.18	13.30	2961.00	98.70	<b>1.30</b>
N° 30	0.60	2.60	2963.60	98.79	<b>1.21</b>
N° 50	0.30	3.10	2966.70	98.89	<b>1.11</b>
N° 100	0.15	13.70	2980.40	99.35	<b>0.65</b>
N° 200	0.075	5.40	2985.80	99.53	<b>0.47</b>
Base	-	11.60	2997.40	99.91	<b>0.09</b>
	<b>Suma</b>	2997.4			
	<b>Pérdidas</b>	2.6			
	<b>MF =</b>	6.76			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 3.2. Curva granulométrica de agregado grueso 3/8"



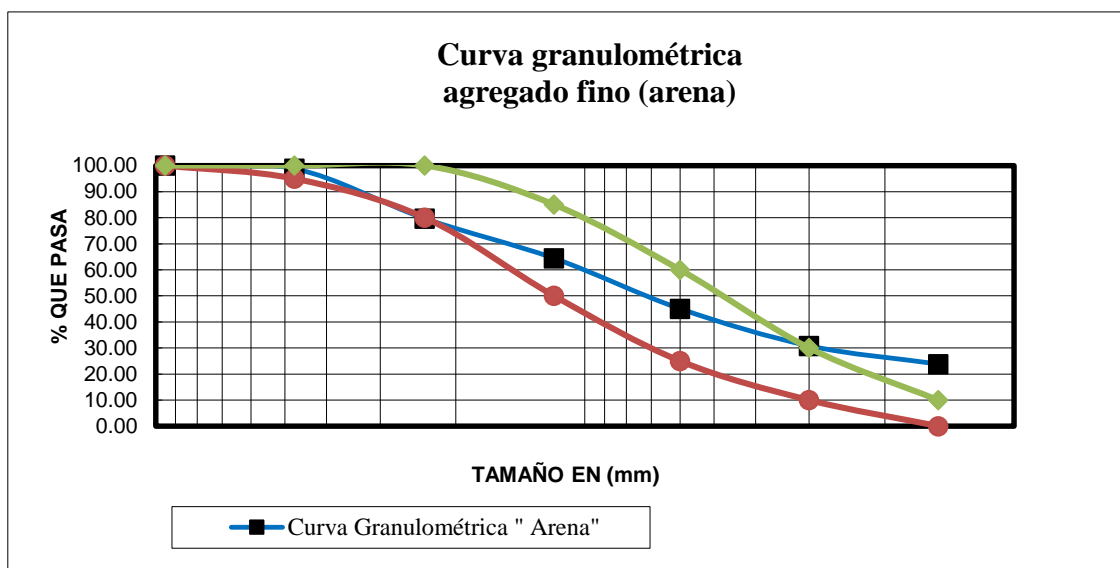
Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 3.3. Curva granulométrica de arena

Peso total (gr.)			800		
Tamices	Tamaño (mm.)	Peso ret.	Ret. acum	% Ret	% que pasa
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
N° 4	4.75	9.30	9.30	1.16	<b>98.84</b>
N° 8	2.36	153.30	162.60	20.33	<b>79.68</b>
N° 16	1.18	122.00	284.60	35.58	<b>64.43</b>
N° 30	0.60	155.00	439.60	54.95	<b>45.05</b>
N° 50	0.30	114.00	553.60	69.20	<b>30.80</b>
N° 100	0.15	56.00	609.60	76.20	<b>23.80</b>
N° 200	0.075	74.90	684.50	85.56	<b>14.44</b>
Base	-	110.60	720.20	90.03	<b>9.97</b>
Suma		795.1			
Pérdidas		4.9			
MF =		3.43			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 3.3. Curva granulométrica de arena



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2 Peso específico para agregado grueso (ASTM C-127)

Esta norma describe el procedimiento para determinar la gravedad específica real, gravedad específica neta y la absorción de agua en los agregados gruesos. La gravedad específica y la absorción, se basan agregados sumergidos en agua después de 24 horas.

Resultados obtenidos

Tabla N° 3.4. Peso específico del agregado grueso 3/4''

Peso específico a granel (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
2.67	2.69	2.74	0.96

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 3.5. Peso específico del agregado grueso 3/8''

Peso específico a granel (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
2.66	2.70	2.78	1.67

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la tabla N° 3.4 y N° 3.5. los resultados, en el cual se especifica la gravedad específica de la muestra de grava es 2.67 gr/cm<sup>3</sup> y de gravilla es de 2.66 gr/cm<sup>3</sup>, el rango de aceptación de los agregados gruesos es de 2.33 a 2.75 gr/cm<sup>3</sup>, cumple satisfactoriamente para cualquier tipo de mezclas asfáltica que se desea elaborar, la gravedad específica aparente del agregado grueso es de 2.74 gr/cm<sup>3</sup> y de la gravilla 2.78 gr/cm<sup>3</sup>, este define que tan poroso es el material, mientras mayor sea su valor menor será los huecos que presente el agregado.

### 3.3.3 Peso específico para agregado fino (ASTM C-128)

Esta norma describe el procedimiento para determinar la gravedad específica real, gravedad específica neta y la absorción de agua en los agregados fino. La gravedad específica y la absorción, se basan agregados sumergidos en agua después de 24 horas

## Resultados obtenidos

Tabla N° 3.6. Peso específico del agregado fino

Peso específico a granel (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico saturado con sup. seca (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	% de absorción
2.70	2.71	2.73	0.48

Fuente: Elaboración propia

En la tabla N° 3.6 se observa que la gravedad específica muestra de arenas es de 2.70 gr/cm<sup>3</sup>; el rango de aceptación de los agregados finos es de 2.21 a 2.70 gr/cm<sup>3</sup>, por lo tanto, cumple con los requerimientos para uso en mezclas asfálticas. La gravedad específica aparente de la arena es de 2.73 gr/cm<sup>3</sup>, al igual que el caso anterior, este peso específico define que tan poroso es el material mientras mayor sea peso específico aparente menor será los huecos que presente el agregado.

La absorción que presenta el agregado fino es de 0.48 % y el rango aceptable es de 0 % a 5 % por lo tanto cumple con el margen de aceptación para utilización de mezclas asfálticas

**3.3.4 Porcentaje de caras fracturadas (ASTM D-5821)**

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.

## Resultados obtenidos

Tabla N° 3.7. Cara fracturada material de 3/4"

Ensayo de caras fracturadas material 3/4"				
Peso de la muestra (gr)	Peso de las caras fracturadas (gr)	Peso de caras sanas (gr)	% de caras fracturadas (%)	Especificaciones técnicas mínimas (%)
1000.00	939.50	60.50	93.95	>75
1000.00	961.90	38.10	96.20	>75
		Promedio	95.07	

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 3.8. Cara fracturada material de 3/8”

Ensayo de caras fracturadas material 3/8”				
Peso de la muestra (gr)	Peso de las caras fracturadas(gr)	Peso de caras sanas (gr)	% de caras fracturadas (%)	Especificaciones técnicas mínimas (%)
1000.00	881.70	118.30	88.20	>75
1000.00	950.90	49.10	95.10	>75
		Promedio	91.65	

Fuente: Elaboración propia

El resultado del ensayo de caras fracturadas fue satisfactorio porque fue mayor al 75 % demostrando así que el agregado es apto para la elaboración de la mezcla asfáltica según especificaciones técnicas.

### 3.3.5 Determinación del desgaste mediante la máquina de los Ángeles (ASTM C-131)

Este método, describe el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de agregado grueso, natural o triturado, usando la máquina de los Ángeles

Resultados obtenidos

Tabla N° 3.9. Desgaste de los Ángeles material de 3/4”

Ensayo de los desgaste de los Ángeles				
Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
B	5000.00	3944.30	21.11	40 % máximo

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 3.10. Desgaste de los Ángeles material de 3/8”

Ensayo de los desgaste de los Ángeles				
Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
C	5000.00	3869.00	22.62	40 % máximo

Fuente: Elaboración propia

El desgaste del agregado grueso es una de las características principales a tener en cuenta en las mezclas asfálticas, dado que la duración y resistencia al desgaste y tiempo, depende de la dureza de la propia roca y del material con que se efectuó el frotamiento. El límite máximo de desgaste para la gradación de la muestra de ensayo es de 40 % según la norma ASTM C-131 AASHTO T-96, en nuestro caso el porcentaje de desgaste



de la grava es de agregado grueso es de 21.11 % gravilla 22.62 %, lo que representa un material resistente y con poco desprendimiento de material fino, según los datos presentados.

### 3.3.6 Equivalente de arena (ASTM D-2419)

Indica bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de arcillas, finos plásticos y polvo presente en suelos granulares y agregados finos que pasan por el tamiz N° 4 o (4.75 mm.).

Resultados obtenidos

Tabla N° 3.11. Equivalente de arena

N° de muestra	H1	H2	Equivalente de arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	10.00	13.90	71.94
2	10.00	13.70	72.99
3	10.00	14.00	71.43
		Promedio	72.12

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 3.12. Resultado de equivalente de arena comparando con el mínimo según norma ASTM D 2419

Equivalente de arena (%)	Norma
72.12	> 50 %

Fuente: Elaboración propia

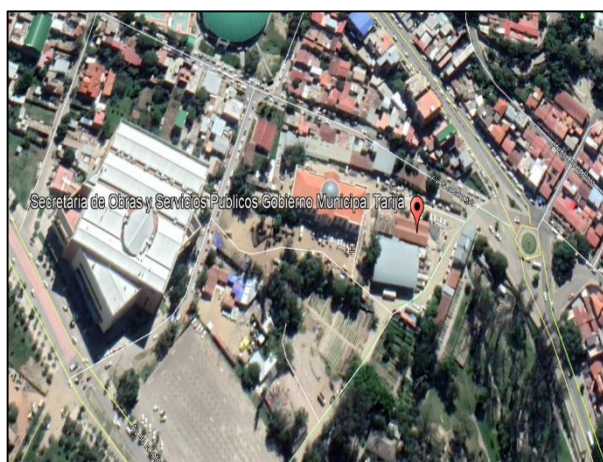
Los límites del equivalente de arena promedio para una base granular a más de 3000 metros sobre el nivel de mar es del 50 % mínimo según norma ASTM D-2419, en nuestro caso tenemos un 72.12 % esto significa que cumple con los requerimientos para uso en mezcla asfálticas, todo esto según datos presentados en la tabla.

### 3.4 CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Los ensayos de caracterización de cemento asfáltico, se realizará en el laboratorio de asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho los ensayos de disponibles, por condiciones de equipo se realizaron los siguientes ensayos, punto de inflamación, punto de ablandamiento, penetración, peso específico del cemento asfáltico, pérdida de masa.

La obtención del cemento asfáltico fue proporcionada por la Alcaldía Municipal de la ciudad de Tarija, de origen de Brasil, fabricante Betunel.

Imagen N° 3.3. Ubicación de la Secretaria de Obras y Servicios Públicos de Gobierno Municipal de Tarija



Fuente: Google earth

#### Ubicación geográfica

Las coordenadas geográficas de la entrada de la planta asfáltica de la Alcaldía Municipal de Tarija.

Latitud: 21°31'36.51" S.

Longitud: 64°44'25.22" O.

Zona: 20

Imagen N° 3.4. Alcaldía Municipal de la ciudad de Tarija



Fuente: Elaboración propia

Nota: Los procedimientos de los ensayos realizados se mostrará en ANEXOS 2.

### 3.4.1 Justificación de selección de cemento asfáltico

La selección de cemento asfáltico para garantizar el comportamiento adecuado de la mezcla asfáltica se analizó lo siguiente:

- Se identifica las condiciones en las que va a trabajar la mezcla: tipo de tráfico, tipo de infraestructura (carretera, vía urbana, aeropuerto, entre otros), la capa de la que se trata (rodadura, intermedia o base) y espesor, naturaleza de las capas subyacentes, clima de la zona de trabajo, se identifica si se trata de un pavimento nuevo o de una repavimentación, entre otros factores. Para el diseño de la mezcla asfáltica en la presente investigación, se considera una mezcla asfáltica como capa rodadura para tráfico pesado, en un pavimento nuevo.
- Determinación de las propiedades fundamentales que ha de tener la mezcla, dadas las condiciones en las que ha de trabajar. Debe establecerse la resistencia a las deformaciones plásticas o la flexibilidad, entre otras.
- La selección de cemento asfáltico a emplear dependerá de, la capa de firme a que se destine la mezcla, el tipo de mezcla, categoría del tráfico, el clima de la zona en la que se encuentra la carretera.

Tabla N° 3.13. Penetración recomendable para diversos tipos de betunes asfálticos

Pavimentación	Clima			
	Cálido árido	Cálido húmedo	Moderado	Frio
Aeropuertos				
Pistas de despegue	60-70	60-70	60-70	85-100
Caminos auxiliares	60-70	60-70	60-70	85-100
Aparcamientos	60-70	60-70	60-30	85-100
Carreteras				
Tráfico pesado	60-70	60-70	60-70	85-100
Tráfico medio, ligero	85-100	85-100	85-100	120-150
Calles				
Tráfico pesado	60-70	60-70	60-70	85-100
Tráfico medio, ligero	85-100	85-100	85-100	85-100
Caminos particulares				
Industriales	60-70	60-70	60-70	85-100
Estación de servicio	60-70	60-70	60-70	85-100
Residenciales	60-70	60-70	85-100	85-100
Aparcamientos				
Industriales	60-70	60-70	60-70	60-70
Comerciales	60-70	60-70	60-70	85-100
Zonas de recreo				
Pista de tenis	85-100	85-100	85-100	85-100
Terrenos de juego	85-100	85-100	85-100	85-100

Fuente: Instituto del asfalto

### 3.4.2 Punto de inflamación (ASTM D-1310)

El método define determinación de los puntos de inflamación y combustión por medio de la copa abierta de Cleveland, para productos del petróleo y otros líquidos.

Resultados obtenidos

Tabla N° 3.14. Resultado del ensayo de punto de inflamación

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Punto de inflamación AASHTO T-48	°C	298	300	>299	232	---

Fuente: Elaboración propia

El resultado del punto de inflamación del cemento asfáltico cumple con las especificaciones mínimas requeridas, con una temperatura de 299 °C es la temperatura a la cual arden los vapores de asfalto al aproximar a la superficie del material una llama de prueba.

### 3.4.3 Penetración (ASTM D-5)

Este método, describe el procedimiento para determinar la dureza, mediante penetración, de materiales bituminosos sólidos y semisólidos.

El ensayo de penetración se usa como medida de consistencia valores altos de penetración indican consistencias más blandas.

Resultados obtenidos

Tabla N° 3.15. Resultado del ensayo de penetración

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm) AASHTO T-49	Lectura N°1	90	89	86	-		
	Lectura N°2	91	85	86	-		
	Lectura N°3	89	89	88	-		
	Promedio	mm.	90	88	87	88	85

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el resultado el índice de penetración es de 85-100 el cemento asfáltico cumple con las especificaciones mínimas requeridas de un resultado de 88 y concuerda con los datos proporcionados por el fabricante.

#### 3.4.4 Peso específico (ASTM D-70)

Este método prueba cubre la determinación de la gravedad específica de materiales bituminosos semisólidos, cemento asfáltico y breas blandas de alquitrán, mediante el uso de picnómetro a la temperatura requerida. El peso específico del asfalto es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos de un pavimento compactado, el asfalto se expande cuando es calentado y se contrae cuando es enfriado, esto significa que el volumen dado de una cierta cantidad de cemento asfáltico será mayor a altas temperaturas.

Resultados obtenidos

Tabla N° 3.16. Resultado de ensayo de peso específico

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Peso picnómetro	gr.	33.60	33.90	32.70			
Peso picnómetro + agua (25°C)	gr.	80.90	80.30	77.50			
Peso picnómetro + muestra	gr.	63.10	62.70	60.80			
Peso picnómetro + agua + muestra	gr.	80.40	80.30	78.50			
Peso específico	gr./cm <sup>3</sup>	0.98	0.99	1.03	1.005	1.00	1.05

Fuente: Elaboración propia

La gravedad específica del asfalto es de 1.005 gr./cm<sup>3</sup> como se muestra en la tabla N° 3.16, ese valor es determinado para calcular el porcentaje de vacíos en la muestra asfáltica como se verá en el siguiente capítulo. El peso específico del cemento asfáltico depende tanto del origen como el proceso de destilación, pero su valor se mantiene cerca de la unidad, razón por la cual permite realizar correcciones de volumen a altas temperaturas.

#### 3.4.5 Pérdida de masa (ASTM-1754)

Este método describe un ensayo para determinar el efecto del calor y aire sobre los materiales asfálticos semisólidos. Los efectos de este tratamiento son determinados para la medida de las propiedades asfálticas antes y después del ensayo.

## Resultados obtenidos

Tabla N° 3.17. Resultado de ensayo de pérdida de masa

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Pérdida en masa	%	0,06	0,07	0,05	0,06		1,00

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el resultado el porcentaje cumple con las especificaciones técnicas de pérdida de masa del cemento asfáltico.

**3.4.6 Punto de ablandamiento del asfalto (ASTM D-36)**

Los asfaltos son materiales termoplásticos, que son afectados por los cambios de temperatura y se ablandan conforme la temperatura aumenta, puesto que no poseen un punto de fusión determinado, sino que se ablandan gradualmente, se calcula el punto de ablandamiento que se define como la temperatura que necesita el asfalto para alcanzar un determinado estado de fluidez.

## Resultados obtenidos

Tabla N° 3.18. Resultado de ensayo de punto de ablandamiento del asfalto

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	45,0	45,0	45,0	42,0	53,0

Fuente: Elaboración propia

El promedio de temperatura obtenido de los dos ensayos es de 45 °C según tabla N° 3.18, la diferencia entre las dos temperaturas hubiese sido de 1 °C (2 °F), tendríamos que haber repetido los ensayos, pero como podemos observar la diferencia es nula 0 °C, por la razón lo cual se encuentran por dentro del límite y cumple con las especificaciones técnicas teniendo un resultado de 45 °C.

### 3.4.7 Ductilidad (ASTM D-113)

La ductilidad de un material bituminosos es la longitud, medida en cm., la cual se alarga (elonga) antes de romperse cuando los extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra se traccionan a la velocidad de 5 cm/min y temperatura a 25 °C.

Resultados obtenidos

Tabla N° 3.19. Resultado de ensayo de ductilidad

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad	cm.	108.00	121.00	131.30	120.10	100.00	

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.8 Viscosidad Saybolt-Furol (ASTM E-102)

El ensayo de viscosidad es determinar el estado de fluidez de los asfaltos a las temperaturas que se emplean durante su aplicación.

Resultados obtenidos

Tabla N° 3.20. Resultado de ensayo de viscosidad Saybolt-Furol

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Especificaciones	
					Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt-Furol	seg.	133.8	131.2	132.5	85	-

Fuente: Elaboración propia

## 3.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES RECICLADOS

Los ensayos de caracterización de los materiales reciclados, se realizará en el laboratorio de asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho los ensayos de disponibles, por condiciones de equipo se realizaron los siguientes ensayos de peso específico.

Nota: Los procedimientos de los ensayos realizados se mostrará en ANEXOS 3.

### 3.5.1 Obtención y caracterización de alambre de neumático fuera uso

El alambre metálico a emplear para la realización de este proyecto de investigación fue extraído de llantas recicladas que están en des uso, el alambre fue extraído en la



reencauchadora “Gareca” con ubicación en la ciudad de Tarija, en la entrada a la comunidad de San Mateo con calles S/N.

Imagen N° 3.5. Ubicación de la reencauchadora “Gareca”



Fuente: Google earth

### Ubicación geográfica

Las coordenadas geográficas de la entrada a la reencauchadora “Gareca”

Latitud: 21°29'56.94” S.

Longitud: 64°45'10.04” O.

Zona: 20

Imagen N° 3.6. Entrada a la reencauchadora “Gareca”



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.1.1 Obtención de la muestra

El material de alambre metálico, se encuentra presente en todos los neumáticos específicamente en el área del talón, estos alambres forman un aro recubiertos de cobre para evitar corrosión y están separados por caucho, en que su función es unir el conjunto en sí de la llanta.

El alambre de neumático se ha extraído mediante un des cejadora, separo los alambres del cinturón de acero que se encuentra en el interior.

Imagen N° 3.7. Maquina reencauchadora



Fuente: Elaboración propia

Imagen N° 3.8. Neumático desgastado en el talón y el cinturón de acero



Fuente: Elaboración propia

El proceso de desgaste se lo hizo mediante unas cuchillas friccionando en la parte de la ceja de interna del neumático, mientras esta giraba.

Luego se extrajo de su recolector todos los alambres de neumático, los que quedaron en el suelo se extrajo mediante un imán.

Imagen N° 3.9. Alambre metálico recogido del suelo mediante imán



Fuente: Elaboración propia

El neumático que se extrajo el alambre, es de marca Bridgestoné en fuera de uso con huellas desgastadas así para que las cuchillas puedan triturar con más facilidad el primer anillo de acero de la llanta, con un ancho de sección de neumáticos en milímetros de 295 mm. relación de altura y el ancho expresado en porcentaje de 80 % con diámetro del aro en pulgadas de 16", con un peso del neumático de 60 kg.

Imagen N° 3.10. Alambre metálico



Fuente: Elaboración propia

### **3.5.1.2 Características de neumático fuera de uso**

A continuación, describe las composiciones de los alambres de ceja para llantas o neumáticos (Emcocables, 2014)

#### **Masa de bronce**

Existe dos clases de alambre, cuales se clasifican así:

Normal 0.3 a 0.7 (gr. bronce / kg de alambre)

Alta resistencia 0.6 a 1.0 (gr. bronce / kg de alambre)

#### **Dimensión y tolerancia**

Diámetro 0.94 mm

Tolerancia +0.05

Redondez 0.03 mm.

#### **Adherencia del alambre bronceado de caucho**

Normal tipo 1: 334 (gr. bronce /kg de alambre)

Normal tipo 2: 380 (gr. bronce / kg de alambre)

Alta resistencia:535 (gr. bronce / kg de alambre)

Nota: el alambre de neumático fuera de uso, para poder maniobrar se redujo a una longitud aproximado de 1 cm. para la elaboración de la mezcla, esta reducción se hizo para que estos no se enlazaran entre sí, así siendo imposible poder distribuirlos en toda la mezcla.

### **3.5.1.3 Peso específico de neumático fuera de uso**

Este método cubre la determinación de la gravedad específica, del material reciclado mediante el uso de picnómetro a la temperatura requerida.

Resultados obtenidos:

Tabla N° 3.21. Peso específico de neumático fuera de uso

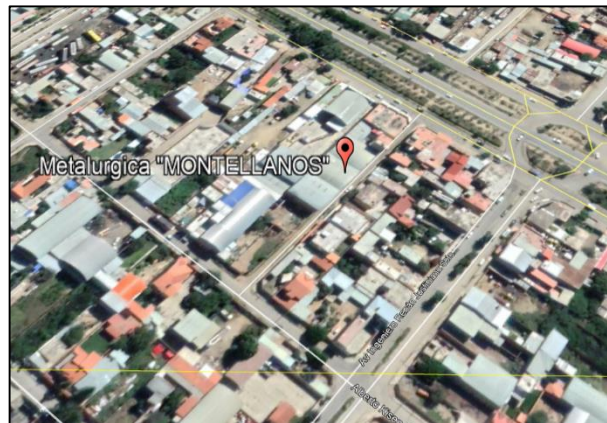
Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Peso de probeta	gr.	32.00	32.00	32.00	
C= Peso de la muestra	gr.	6.00	12.00	18.00	
D= Peso probeta + agua	gr.	48.00	47.50	50.00	
E= Peso probeta + agua + muestra	gr.	52.89	57.27	64.67	
Peso Específico (C/C+D-E)	gr./cm <sup>3</sup>	<b>5.41</b>	<b>5.38</b>	<b>5.41</b>	<b>5.40</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.2 Obtención y caracterización de limadura metálica

La limadura metálica fue recogida de la metalúrgica “Montellanos” con ubicación en la ciudad de Tarija, barrio San Jorge, en la calle pasaje I, N° 146, entre calles Alberto Kisen B. y avenida Jaime Paz Zamora.

Imagen N° 3.11. Ubicación de la metalúrgica “Montellanos”



Fuente: Google earth



Imagen N° 3.12. Entrada a la metalúrgica “Montellanos”



Fuente: Elaboración propia

#### 3.5.2.1 Obtención de la muestra

Las limaduras también conocidas como virutas provenientes del amolado de aserrado, limado y recortes de piezas metálicas, forman parte de chatarra y desperdicios y desechos de fundición de acero.

Imagen N° 3.13. Sierra Circular



Fuente: Elaboración propia

El equipo de corte con sierra circular, se utilizó para cortar de forma manual los materiales metálicos desechados en las acerías y metalúrgicas, se procede al reciclaje de este tipo de materiales en forma de escoria y polvo de acero.

Imagen N° 3.14. Limadura metálica



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.3.2 Características de limadura metálica

De esta manera tenemos las siguientes propiedades para este material

Estado físico: Presenta un estado físico sólido granulado, a temperatura ambiente

Olor: Este material no presenta un olor alguno.

Solubilidad: Material es insoluble al agua

Ebullición: Presenta una temperatura de ebullición a 2782 °C

Fusión: Presenta una temperatura de fusión de 1535 °C

Inhalación: Puede causar posibles irritaciones en tracto respiratorio, tos dificultad respiratorias.

Condición inflamatoria: Este material es ligeramente combustible

Producto de combustión: El agente de combustión presente en este material son los óxidos de hierro

### 3.5.2.3 Peso específico de limadura metálica

Este método cubre la determinación de la gravedad específica, del material reciclado mediante el uso de picnómetro a la temperatura requerida.

Resultados obtenidos:

Tabla N° 3.22. Peso específico de limadura metálica

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Peso de probeta	gr.	32.00	32.00	32.00	
C= Peso de la muestra	gr.	6.00	12.00	18.00	
D= Peso probeta + agua	gr.	46.20	47.00	46.00	
E= Peso probeta + agua + muestra	gr.	49.50	53.63	55.90	
Peso Específico (C/C+D-E)	gr./cm <sup>3</sup>	<b>2.22</b>	<b>2.23</b>	<b>2.22</b>	<b>2.23</b>

Fuente: Elaboración propia



## **CAPÍTULO IV**

### **DISEÑO, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL, CON LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CON ADICIÓN DE LOS MATERIALES METÁLICOS RECICLADOS**

#### **4.1 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICA EN CALIENTE**

El diseño de mezclas asfálticas en caliente tiene como objetivo el obtener un producto capaz de soportar todos y cada uno de los factores que determina su necesidad como son el tráfico, el clima entre otras, las cuales pueden afectar a su desempeño como capa de rodadura terminada si no se determina de manera adecuada la mezcla óptima de agregados y asfalto para soportar dichos factores.

En la presente investigación se realiza el diseño de una mezcla asfáltica en caliente elaborada convencionalmente es decir con la mezcla de agregado y ligante asfáltico, y se analiza los efectos que produce la adición de dos nuevos materiales reciclados (limadura metálica, alambre de neumáticos fuera de uso), siendo estos adicionados de manera individual y porcentual con relación al porcentaje de la mezcla total en reemplazo de agregado pétreo en la mezcla, haciendo énfasis en analizar los resultados de estabilidad y flujo de las muestras elaboradas.

Existen diferentes métodos para diseñar mezclas asfálticas entre los cuales tenemos: Marshall, Hveem y Superpave, entre los más utilizados. En este trabajo se aplicará la metodología de Marshall para el diseño de las mezclas asfálticas que se realicen.

Los ensayos de Marshall fueron realizados en el laboratorio de asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

##### **4.1.1 Método Marshall**

El método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas consiste específicamente en determinar un porcentaje óptimo de contenido de asfalto con relación a la mezcla total óptima de agregados, la cual también es diseñada en proporciones ideales, dicha mezcla debe garantizar el adecuado acomodo de las partículas del agregado y ligante.

El método se aplica a mezclas en caliente, y toma en cuenta las propiedades del ligante asfáltico, así como también el tamaño de los agregados utilizados, además ser versátil a su uso tanto en laboratorio.

En este trabajo se utilizará este método para desarrollar el diseño de la mezcla asfáltica en caliente, por el cual a continuación se detalla los procesos y ensayos requeridos para llevar a cabo el diseño tanto en mezcla convencional, así como también al ser realizada con materiales reciclados metálicos descritos.

#### **4.1.2 Procedimientos requeridos por el método Marshall**

El método Marshall al igual que otros métodos para el diseño de mezcla asfáltica requiere de un proceso sistemático para la elaboración, ensayo y evaluación del nuevo material en este orden específico por lo cual se hace necesario la descripción de estos pasos.

##### **Elaboración de especímenes Marshall**

El ensayo Marshall requiere de la elaboración y ensayo de mezclas asfálticas compactadas para determinar luego del proceso de compactación su relación densidad-volumen, así como también su relación estabilidad-fluencia, para lo cual seguir el siguiente procedimiento:

##### **Preparación de los agregados**

Según la caracterización de los agregados pétreos definidos en el capítulo III de esta investigación el agregado caracterizado por su granulometría cumple con la normativa al encontrarse dentro de los límites según ASTM C 136.

El proceso normal se hace una de estabilización granulométrica, el cual consiste en utilizar un porcentaje menor de materia pasante con relación al pasante original de cada tamiz, para cumplir así los requerimientos de la norma ASTM D 3515.

Tabla N° 4.1. Graduaciones propuestas para mezclas asfálticas

Abertura de malla	Tamaño máximo nominal del agregado								
	2 pulg. (50.00 mm.)	1 ½ pulg. (37.50 mm.)	1 pulg. (25.00 mm.)	¾ pulg. (19.00 mm.)	½ pulg. (12.50 mm.)	3/8 pulg. (9.50 mm.)	N ° 4 (4.75 mm.)	N ° 8 (2.36 mm.)	N ° 16 (1.18 mm.)
2 ½ “ (63.0 mm.)	100-100	-	-	-	-	-	-	-	-
2 “ (50.0 mm.)	90-100	100-100	-	-	-	-	-	-	-
1 ½ “ (37.5 mm.)	-	90-100	100-100	-	-	-	-	-	-
1 “ (25.0 mm.)	60-80	-	90-100	100-100	-	-	-	-	-
¾ “ (19.0 mm.)	-	56-80	-	90-100	100-100	-	-	-	-
1/2 “ (12.5 mm.)	35-65	-	56-80	-	90-100	100-100	-	-	-
3/8 “ (9.5 mm.)	-	-	-	56-80	-	90-100	100-100	-	-
N ° 4 (4.75 mm.)	17-47	23-53	29-53	35-65	44-74	55-85	80-100	-	100-100
N ° 8 (2.36 mm.)	13-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	65-10	-	95-100
N ° 16 (1.18 mm.)	-	-	-	-	-	-	40-80	-	85-100
N ° 30 (600 µm.)	-	-	-	-	-	-	35-65	-	70-95
N ° 50 (300 µm.)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	-	45-75
N ° 100 (150 µm.)	-	-	-	-	-	-	3-20	-	20-40
N ° 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	3-9	3-9	4-10	4-11	5-12	6-12	7-12	8-12

Fuente: ASTM D3515. Especificación estándar para mezclas asfaltadas bituminosas de mezcla en caliente.

En la tabla N° 4.1 se observa los límites propuestos por la norma ASTM para elegir el huso granulométrico adecuado para la elaboración de la mezcla asfáltica de acuerdo al tamaño máximo nominal de la partícula en este caso para un tamaño de 3/4”. (19 mm.). Este es un proceso iterativo para lo cual es necesario imponerse porcentajes pasantes de mezcla que recaigan dentro de los límites propuestos por norma ASTM D 3515.

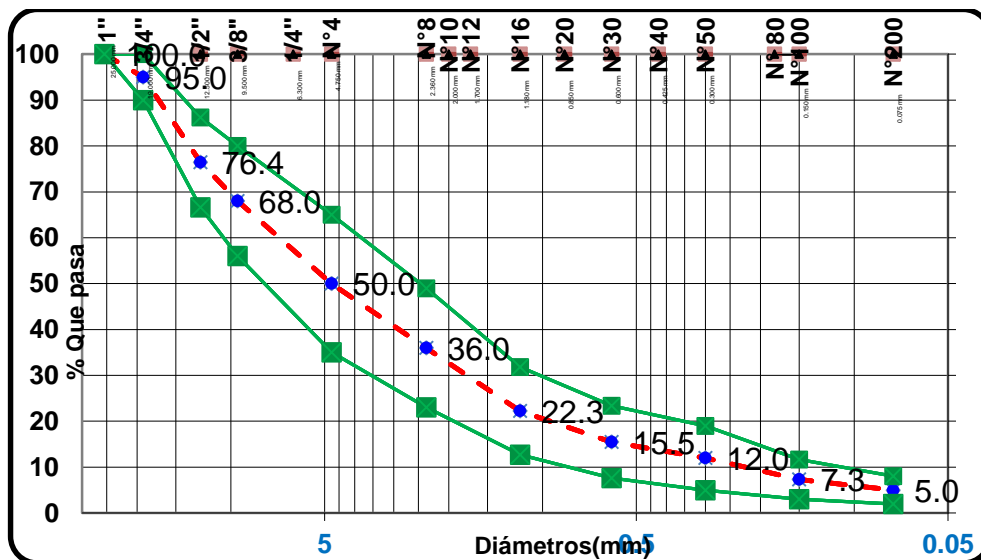
se procede a realizar una estabilización granulométrica a través de la cual pueda obtener porcentajes exactos de material pasante de la mezcla de agregados, obteniendo así los porcentajes exactos de material pasante y además los pesos de agregado retenido de cada tipo, en esta investigación se utilizará una granulometría ideal es decir la media de porcentaje que pase según la especificación graduación media de la franja de 3/4”, los cuales indican en la siguiente tabla N° 4.2.

Tabla N° 4.2. Dosificación de materiales pétreos

Tamices		% que pasa	Especificación graduación media	
pulg.	mm.		Inf.	Sup.
1"	25.4	100.0	100	100
3/4"	19.1	95.0	90	100
1/2"	12.5	76.4	67	86
3/8"	9.5	68.0	56	80
#4	4.8	50.0	35	65
#8	2.4	36.0	23	49
#16	1.2	22.3	13	32
#30	0.6	15.5	8	23
#50	0.3	12.0	5	19
#100	0.2	7.3	3	12
#200	0.1	5.0	2	8

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 4.1. Granulometría definida para mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia

Estos resultados son el producto de proceso arduo de selección de la proporción ideal de agregados la cual en combinación con la dosificación óptima de ligante asfáltico que se detalla a continuación, determinan las proporciones adecuadas de todos los materiales que intervienen en la elaboración de la mezcla asfáltica final.

### **Preparación de la mezcla**

Tomando en cuenta las proporciones de agregados propuesta en el acápite anterior se procede a la elaboración de los especímenes de ensayo conocidos también como briquetas, las cuales responden a las siguientes características.

## Dosificación de las briquetas

Tabla N° 4.3. Dosificación de mezcla asfáltica convencional diseño 1.0

### Dosificación diseño ensayo Marshall convencional diseño 1.0

Tamiz	% Pasa	% Retenido	% Ret. Tamiz	4.5%		5.0%		5.5%		6.0%		6.5%	
				P. Parcial	P. Acumul.	P. Parcial	P. Acumul.	P. Parcial	P. Acumul.	P. Parcial	P. Acumul.	P. Parcial	P. Acumul.
1"	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3/4"	95.0	5.0	5.0	57.3	57.3	57.0	57.0	56.7	56.7	56.4	56.4	56.1	56.1
1/2"	76.4	23.6	18.6	212.8	270.1	211.7	268.7	210.6	267.3	209.5	265.9	208.4	264.5
3/8"	68.0	32.0	8.4	96.6	366.7	96.1	364.8	95.6	362.9	95.1	361.0	94.6	359.0
Nº4	50.0	50.0	18.0	206.3	573.0	205.2	570.0	204.1	567.0	203.0	564.0	202.0	561.0
Nº8	36.0	64.0	14.0	160.4	733.4	159.6	729.6	158.8	725.8	157.9	721.9	157.1	718.1
Nº16	22.3	77.7	13.7	157.5	890.9	156.6	886.2	155.8	881.6	155.0	876.9	154.2	872.2
Nº30	15.5	84.5	6.8	77.5	968.4	77.1	963.4	76.7	958.3	76.3	953.2	75.9	948.1
Nº50	12.0	88.0	3.5	40.1	1008.5	39.8	1003.2	39.6	997.9	39.4	992.6	39.2	987.4
Nº100	7.3	92.7	4.7	53.5	1061.9	53.2	1016.5	52.9	1011.2	52.6	1045.3	52.3	1039.7
Nº200	5.0	95.0	2.3	26.8	1088.7	26.6	1043.2	26.5	1037.7	26.3	1071.6	26.2	1065.9
Filler	0	100.0	5.0	57.3	1146.0	57.0	1100.2	56.7	1094.4	56.4	1128.0	56.1	1122.0
<b>Peso Total=</b>				<b>1146.0</b>		<b>1140.0</b>		<b>1134.0</b>		<b>1128.0</b>		<b>1122.0</b>	

<b>Peso agregado pétreo=</b>	<b>1146.0</b>	<b>1140.0</b>	<b>1134.0</b>	<b>1128.0</b>	<b>1122.0</b>
<b>Peso asfalto=</b>	<b>54.0</b>	<b>60.0</b>	<b>66.0</b>	<b>72.0</b>	<b>78.0</b>
<b>Peso Total Material + C. Asf.=</b>	<b>1200.0</b>	<b>1200.0</b>	<b>1200.0</b>	<b>1200.0</b>	<b>1200.0</b>

Fuente: Elaboración propia

Obteniendo los porcentajes retenidos por cada tamiz se procede a calcular los pesos de agregado de cada tamiz y los pesos de material asfáltico.

Imagen N° 4.1. Agregado pétreo seleccionado según tamaño



Fuente: Elaboración propia

### **Elaboración de las briquetas**

Las briquetas se prepararon con diferentes contenidos de asfalto variando este contenido en un 0.5 % entre cada una de ellas, es necesario elaborar al menos 3 briquetas para cada contenido de ligante asfáltico combinando con agregados a evaluar, así entonces contenidos de asfalto correspondientes a 4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %, 6.5 %, en peso con la relación al peso total de agregados serán elaborados, por ende se realiza un total de 15 briquetas las cuales son ensayadas para luego determinar en base a sus resultados el contenido de asfalto óptimo.

Para la elaboración de las briquetas primero calienta los agregados a una temperatura de 140 °C, y el ligante asfáltico a una temperatura similar en el horno.

Imagen N° 4.2. Moldes precalentados en el horno



Fuente: Elaboración propia

Imagen N° 4.3. Adición de ligante asfáltico al mix de agregados



Fuente: Elaboración propia

Una vez adicionando el ligante asfáltico al mix de agregados, se procede a mezclar estos materiales en una olla metálica al calor de una estufa, por el tiempo que sea necesario para que los agregados sean completamente cubiertos por el ligante asfáltico, cuidando que la temperatura de la mezcla no produzca la evaporación de este último, y por ende pérdida de material asfáltico en la mezcla.



Imagen N° 4.4. Mezclando el mix de agregados con ligante asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Cuando se observa que el material pétreo está cubierto completamente por el material ligante asfáltico, se procede a colocar la mezcla asfáltica en los moldes Marshall previamente calentados, este proceso esencial en la elaboración de la mezcla ya que tanto el diseño de la mezcla asfáltica como en la producción y colocación de carpeta asfáltica, se debe llevar un estricto control de la temperatura de producción y aplicación del producto, razón por la cual todos los elementos que formen parte del proceso de elaboración deben tener igual o mayor temperatura a la mezcla asfáltica porque esta no pierda temperatura y sea compactada de manera correcta.

La base del molde como la parte superior (superficie de contacto con el pisón o martillo Marshall) de la mezcla se debe colocar un papel filtro con la finalidad de evitar que la mezcla se adhiera al molde o al martillo y se produzca pérdidas en peso de la briqueta, y sin duda tener cuidado de que en la colocación no se produzca desperdicios.

Imagen N° 4.5. Agregando la mezcla a los moldes precalentados



Fuente: Elaboración propia

Una vez colocada la mezcla en el molde se debe golpear la mezcla para distribuirla con una espátula o barrilla precalentada previamente dando unos 25 golpes en total, aplicadas de la siguiente forma: en la parte perimetral de la mezcla en un total de 15 golpes, y en la parte central de la misma manera en un total de 10 golpes, antes de llevar al compactador se debe controlar la temperatura cual debe ser de 140 °C, de no ser así se debe llevar el molde con muestra al horno para elevar la temperatura al valor indicado.( ASTM D1559)

Imagen N° 4.6. Control de temperatura de la mezcla



Fuente: Elaboración propia

Este proceso es realizado de la manera más eficiente posible tanto en la aplicación de los golpes evitando que se produzca desperdicios de material entre el molde y el collarín, así como también verificar que no quede material residual a los elementos usados en este proceso.

Con la temperatura adecuada se procede a llevar al molde con la muestra al compactador mecánico Marshall se procede a aplicar 75 golpes por cada cara de la briqueta.

Imagen N° 4.7. Compactación de briquetas Marshall



Fuente: Elaboración propia

Luego de compactado el espécimen por ambos lados se debe identificar claramente en el mismo porcentaje de asfalto que contiene y se deja enfriar por un mínimo de 15 horas, para luego ser extraído mediante un extractor de muestra de su molde, quedando así listo para su ensayo respectivo.

Imagen N° 4.8. Extractor de muestra Marshall



Fuente: Elaboración propia

Una vez extraída la briqueta con el gato hidráulico, determinamos sus propiedades volumétricas mediante un proceso de control de peso.

Imagen N° 4.9. Numeración y ordenamiento de briquetas



Fuente: Elaboración propia

### Procedimientos de determinación de parámetros volumétricos de la muestra

Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica son los que proporciona una predicción de funcionamiento de la misma durante su periodo de operación, razón por la cual este parámetro debe cumplir con los valores normativos que garantice un desempeño adecuado de la mezcla en funcionamiento.

La densidad real es la que considera el volumen macizo de la probeta, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles.

Para calcular la densidad real de la mezcla se usa el método con superficie saturada seca, ya que este método se emplea para muestras con porcentajes de absorción menores a 2 %.

El procedimiento necesario para llevar a cabo la determinación de estos parámetros se realiza de la siguiente manera.

- 1) Dejar secar las muestras a temperatura ambiente, pesar y registrar este valor como "A".

Imagen N° 4.10. Peso de cada muestra seca



Fuente: Elaboración propia

- 2) Luego se sumerge la briqueta con la balanza de inmersión para saturarla en agua a 25 °C por un lapso de 5 a 15 minutos, secar superficialmente, pesar y llamar este valor como "B".

Imagen N° 4.11. Briqueta sumergida en agua a 25 °C



Fuente: Elaboración propia

3) Sumergir la muestra y el peso registrar con “C”.

Imagen N° 4.12. Registro del peso sumergido



Fuente: Elaboración propia

### **Procedimiento de ensayo de estabilidad y fluencia**

Una vez determinado los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica, se debe medir con un vernier en 4 puntos de la briqueta, las alturas, para sacar un promedio y usar un factor de corrección en la estabilidad.

Se analiza el comportamiento de la mezcla ante el efecto de cargas para lo cual se efectúa un análisis de estabilidad –flujo de la briqueta sometida a una carga vertical por parte de la prensa Marshall de 27 KN (6000 libras) de capacidad, el cual aplica carga al espécimen de ensayo a una velocidad de avance constante de 50.8 mm/min (2”).

Para llevar a cabo este ensayo se debe preparar la briqueta de acuerdo a ciertas condiciones de aplicación y temperatura proceso que se lleva a cabo de la siguiente manera.

- 1) Se calienta la briqueta en agua precalentada a una temperatura de 60 °C en el baño maría por un lapso de 30 minutos.

Imagen N° 4.13 Briquetas sumergidas a 60 °C



Fuente: Elaboración propia

- 2) Una vez cumplido el lapso de calentamiento se retira la briqueta del baño maría, para luego ser colocada en las mordazas Marshall que debe estar precalentadas, y se colocan en la prensa Marshall para aplicar carga al espécimen y medir su valor resistencia hasta la falla que se registra como valor de estabilidad e igualmente se registra su valor de deformación al momento de la falla a través del deformímetro que será denominado como valor de flujo.



Imagen N° 4.14 Ensayo Marshall de estabilidad-flujo



Fuente: Elaboración propia



### 4.2 DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL

Tabla N° 4.4. Datos de la mezcla asfáltica convencional diseño 1.0

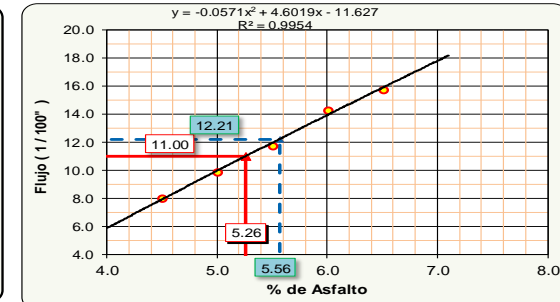
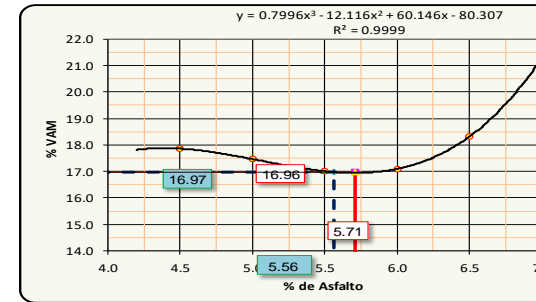
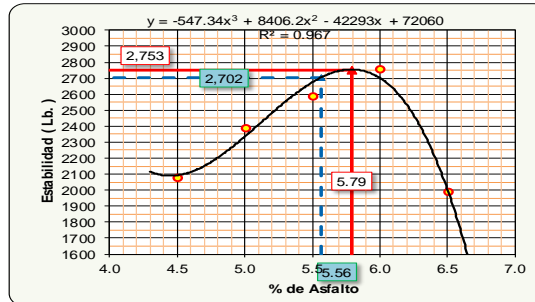
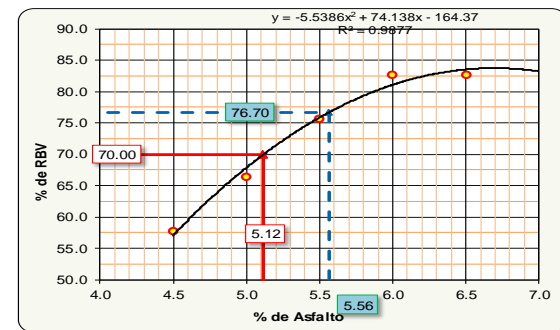
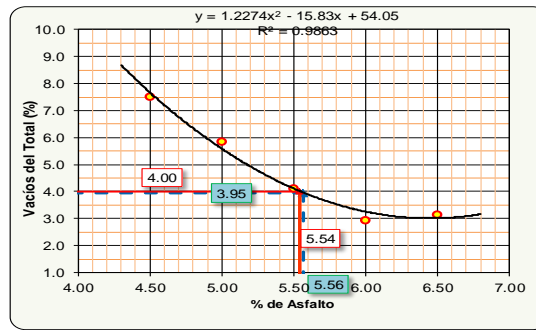
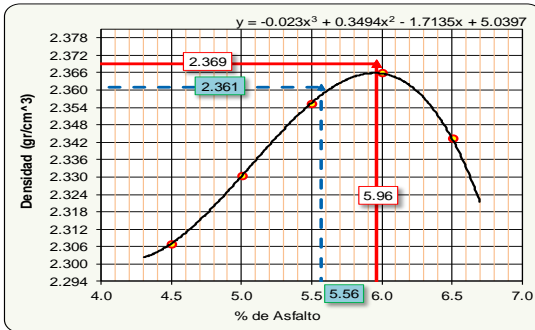
LABORATORIO DE ASFALTOS																						
" DISEÑO DE MEZCLA AFALTICA EN CALIENTE // METODO MARSHALL "																						
Proyecto: PROYECTO DE GRADO												Fecha: 01/08/2019				DISEÑO - 1.0						
Pesos Especificos (AASHTO T-100 , T-85)			% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20				DOSIFICACION			GRAVA	GRAVILLA	ARENA CHANCADA								
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2.665	gr/cm <sup>3</sup>	50	Tipo de asfalto AASHTO M20	85-100				% DE AGREGADOS :			3/4"	3/8"	N°4								
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2.700	gr/cm <sup>3</sup>	50	P. Especifico Total AASHTO T-228	1.005				ORIGEN AGREGADOS :			24%	26%	50%								
P. Esp. Agregado Total (Gag)	2.682	gr/cm <sup>3</sup>	100	BETUNEL							2.67	2.66	2.70		Peso especifico agregados							
N° GOLPES: 75			130 °C Compactación				Material de Acopio Planta de Asfaltos - SEDECA - CHARAJA															
IDENTIFICACION	ALTURA BRIQUETA ( CM )	% DE ASFALTO			PESO BRIQUETA EN EL AIRE (gr)	PESO BRIQUETA EN EL AIRE S.S.S. (gr)	PESO BRIQUETA SUMERGIDA EN AGUA (gr)	VOLUMEN BRIQUETA (cm3)	DENSIDAD BRIQUETA			% Vacios			ESTABILIDAD (Lb)					LECT. DIAL	FLUJO 1/100	MEDIA
		BASE AGREGADO	BASE MEZCLA	REAL ( Dr. ) (g/cm3)					PROMEDIO ( Dm.) (g/cm3)	MAXIMA TEORICA (g/cm3)	MEZCLA ( Vv ) (%)	AGREGADOS ( VAM ) (%)	LLENOS DE ASFALTO ( RBV ) (%)	LECT. DIAL	REAL	MEDIA	FACTOR DE CORRECCION ( ALTURA ) mm	MEDIA f.c.	CORREGIDA			
		%	%	-					-	-	-	-	-	-	%	%	%	mm.	libras			
1	6.32	4.71	4.50	1186.2	1187.5	673.5	514.0	2.308						932	2054.7		1.008			8	7.5	
2	6.25	4.71	4.50	1191.3	1192.1	676.2	515.9	2.309						941	2074.5		1.027			9	8.5	
3	6.35	4.71	4.50	1187.2	1188.4	673.2	515.2	2.304	2.307	2.495	7.53	17.86	57.84	922	2032.6	2054.0	1.000	1.012	2078.6	8	8.0	8.00
4	6.33	5.26	5.00	1194.3	1195.3	683.1	512.2	2.332						1070	2358.9		1.005			9	9.0	
5	6.25	5.26	5.00	1191.5	1192.3	680.2	512.1	2.327						1068	2354.5		1.027			11	10.6	
6	6.29	5.26	5.00	1195.7	1196.8	684.3	512.5	2.333	2.330	2.476	5.86	17.46	66.41	1065	2347.9	2353.8	1.016	1.016	2391.4	10	10.0	9.87
7	6.15	5.82	5.50	1177.8	1178.4	678.2	500.2	2.355						1126	2482.4		1.056			12	12.2	
8	6.31	5.82	5.50	1195.7	1196.2	688.9	507.3	2.357						1136	2504.4		1.011			12	12.1	
9	6.25	5.82	5.50	1185.2	1186.5	683.1	503.4	2.354	2.355	2.457	4.13	17.02	75.75	1156	2548.5	2511.8	1.027	1.031	2589.6	11	11.0	11.77
10	6.27	6.38	6.00	1185.9	1186.4	685.2	501.2	2.366						1205	2656.5		1.021			14	13.5	
11	6.15	6.38	6.00	1183.1	1183.9	684.2	499.7	2.368						1225	2700.6		1.056			15	15.2	
12	6.30	6.38	6.00	1195.2	1196.4	690.8	505.6	2.364	2.366	2.438	2.96	17.09	82.66	1215	2678.6	2678.6	1.013	1.030	2758.9	14	14.1	14.27
13	6.23	6.95	6.50	1193.1	1194.1	686.2	507.9	2.349						901	1986.3		1.032			15	15.4	
14	6.34	6.95	6.50	1199.2	1200.2	688.4	511.8	2.343						892	1966.5		1.003			16	16.3	
15	6.40	6.95	6.50	1187.8	1188.3	680.2	508.1	2.338	2.343	2.420	3.16	18.32	82.75	897	1977.5	1976.8	0.988	1.008	1992.6	16	15.5	15.73
OBSERVACIONES		ESPECIFICACIONES				3 - 5		65 - 75		≥ 1800 Lb.		8 - 14										

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 4.2. Gráficas ensayo Marshall de mezcla asfáltica convencional diseño 1.0

**GRAFICOS DE ENSAYOS MARSHALL // CEMENTO ASFALTICO**

REGISTRO: **DISEÑO - 1.0**



VALORES			
CARACTERISTICAS	% DE ASFALTO	OBTENIDOS DE GRAFICOS	ESPECIFICACIONES TECNICAS
DENSIDAD	5.96	2.37	-----
% VACIOS	5.54	4.00	3    5
R.B.V.	5.12	70.00	65   75
V.A.M.	5.71	16.96	
ESTABILIDAD (Lb.)	5.79	2752.64	> 1800 Lb. (75 Golpes)
FLUENCIA 1/100"	5.26	11.00	8    14
PROMEDIO (%)	<b>5.56</b>	Determinación del contenido óptimo de Asfalto Promedio de las Gráficas (Densidad, Vv, RBB V.A.M y Estabilidad)	

VALORES OBTENIDOS DISEÑO MARSHALL			
CARACTERISTICAS	% DE ASFALTO	VALORES CON EL % OPTIMO	ESPECIFICACIONES TECNICAS
DENSIDAD	5.56	2.36	-----
% VACIOS	5.56	3.95	3    5
R.B.V.	5.56	76.70	65   75
V.A.M.	5.56	16.97	
ESTABILIDAD (Lb.)	5.56	2702.30	> 1800 Lb. (75 Golpes)
FLUENCIA 1/100"	5.56	12.21	8    14
<b>% OPTIMO DE ASFALTO PROPUESTO</b>			<b>5.56</b>

OBSERVACIONES:		
<b>MEZCLA BITUMINOSA TOTAL</b>	GRAVA 3/4"	22.29
	GRAVILLA 3/8"	24.93
	ARENA CHANCADA	47.22
	% ASF. OTP.	5.56
<b>TOTAL</b>	<b>100.0%</b>	

Asfalto ± 0,3 % del Optimo de la Mezcla :	Min. <b>5.39</b>	Max. <b>5.74</b>
---	------------------	------------------

Univ. Edsson Velásquez Garzón  
**Laboratorista**

Tec. Carlos Marcelo Subía Cruz  
**Técnico de Laboratorio**

Ing. Seila Claudia Ávila Sandoval  
**Resp. Lab. Asfaltos - UA/IMS**

Fuente: Elaboración propia

Con la representación gráfica de los valores obtenidos mediante ensayo, la determinación de los porcentajes y valores óptimos obtenidos mediante la misma se concluye con el ensayo Marshall y se especifica de manera exacta todos y cada uno de los parámetros requeridos para correcto desempeño de la mezcla.

Tabla N° 4.5. Valores con el porcentaje óptimo de mezcla asfáltica convencional

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de asfalto	Valores con él % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad	5.56	2.36	-	-
% Vacíos	5.56	3.95	3	5
% R.B.V.	5.56	76.70	65	75
% V.A.M	5.56	16.97	-	-
Estabilidad (lbf)	5.56	2702.30	> 1800 lbf. (75 golpes)	
Fluencia 1/100"	5.56	12.21	8	14
% Óptimo de asfalto propuesto			5.56	

Fuente: Elaboración propia

### Relaciones y observaciones de resultados de los ensayos

Cuando los resultados de los ensayos se trazan en gráficas, como el gráfico N° 4.2 usualmente revelan ciertas tendencias en las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades de la mezcla. A continuación, se enuncian tendencias que pueden observarse al estudiar las gráficas.

- La tendencia de porcentaje de vacíos disminuye a medida que se adiciona más el contenido de asfalto.
- La curva del porcentaje de vacíos de agregado mineral (%V.A.M.) disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con la adición de más contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos llenos de asfalto (% R.B.V.) la curva tiende a ascender con la adición de más contenido de asfalto.
- La curva para densidad de la mezcla es similar a la curva de estabilidad excepto que la densidad máxima presenta a un contenido de asfalto ligeramente mayor que el determina la máxima estabilidad.

- La curva de estabilidad asciende a medida que el contenido de asfalto aumenta, hasta un punto máximo, luego de este valor la estabilidad tiende a descender con cualquier aumento en el contenido de asfalto.
- Los valores de fluencia aumentan a medida que se adiciona más contenido de asfalto

Tabla N° 4.6. Pesos y proporciones exactas para la mezcla asfáltica convencional diseñada

Briqueta de diseño Marshall			
Material		% Con relación a la mezcla óptima	Pesos óptimos en gramos
Agregados	Grueso (3/4")	22.29	267.48
	Grueso (3/8")	24.93	299.16
	Fino	47.22	566.64
Ligante asfáltico		5.56	66.72
Total		100.0	1200

Fuente: Elaboración propia

De los resultados detallados en la tabla N° 4.6, los pesos de agregados tanto grueso 3/4" es de 267.48 gr. agregado 3/8" es de 299.16 gr. y agregado fino peso de 566.64 gr. respectivamente, corresponden a la estabilización granulométrica, mientras el peso de ligante asfáltico (66.72 gr.) corresponde a un valor de 5.56 % del peso total de la mezcla. De esta manera se determina los porcentajes óptimos de cada material presente en la mezcla asfáltica Marshall convencional con relación al peso total de agregados.

#### **4.3 DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA ADICIONANDO LIMADURA METÁLICA**

Para dar paso al uso del primer material reciclado propuestos en esta investigación se debe incluir el mismo proceso Marshall de diseño de mezcla asfálticas en caliente, el primer material que se incluye es la limadura metálica la cual será incluida como porcentaje en base al peso total de la mezcla en reemplazo del agregado pétreo, el porcentaje óptimo de ligante asfáltico permanece como variable y se verificara su incidencia con cada aumento del material reciclado metálico reciclado que se incluirá en la mezcla.

Dicho esto se denota que el objetivo de incluir este material por vía seca en la mezcla asfáltica diseñadas es el encontrar un porcentaje de limadura metálica óptimo, que permita mediante su inclusión en la mezcla de acuerdo al resultado, una mejora o perjuicio de la misma en cuanto a su eficiencia como material asfáltico comprobando esto mediante la evaluación de resultados que permitan diferenciar la variación de sus parámetros de estabilidad o flujo es beneficio o perjuicio de aquellos obtenidos en la mezcla asfáltica convencional.

Se realiza mezcla asfáltica adicionando porcentajes de 0.5 % al 2.5 % de limadura metálica aumentando en 0.5 % su valor de contenido es decir se elaboran mezclas de 0.5 %, 1.0 %, 1.5 %, 2.0 % y 2.5 % de contenido de limadura metálica con relación al peso total de la mezcla en reemplazo de agregado pétreo.

Imagen N° 4.15. Agregados pétreos adicionando limadura metálica



Fuente: Elaboración propia

Todos y cada uno de los procesos mencionados para llevar a cabo el método Marshall deben aplicarse de la misma manera en toda su extensión, luego de tener los porcentajes de agregados pétreo y la proporción óptima de ligante asfáltico con cada aumento del material modificador, que se observarán anexos el diseño 2.1, diseño 2.2, diseño 2.3, diseño 2.4, diseño 2.5. Se refleja en la tabla N° 4.8 que es la dosificación del diseño 2.0, que los valores del óptimo de cemento asfáltico con cada aumento de material reciclado metálico disminuyen.

### Dosificación de mix de agregados con limadura metálica

Se realizan de igual manera un total de 15 briquetas como exige el método para el ensayo y determinación de parámetros tanto volumétricos como de estabilidad- flujo usando los porcentajes ya mencionados mediante las cuales se establecerán los gráficos de análisis y determinación de cantidades óptimas de limadura metálica e intervenir en la mezcla.

Imagen N° 4.16. Mezcla de agregados, ligante asfáltico y limadura metálica



Fuente: Elaboración propia

Imagen N° 4.17. Briqueta elaborada adicionando limadura metálica



Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 4.7. Dosificación de mezcla asfáltica adicionando limadura metálica diseño 2.0

**Dosificación diseño ensayo Marshall para limadura metálica diseño 2.0**

Porcentaje limadura metálica				0.50%		1.00%		1.50%		2.00%		2.50%	
Porcentaje de agregados				93.76%		93.25%		92.95%		92.50%		92.04%	
Porcentaje ópt, de asfalto				5.74%		5.75%		5.55%		5.50%		5.46%	
TAMIZ	% Pasa	% Retenido	% Ret. Tamiz	P. Parcial	P. Acumulado	P. Parcial	P. Acumulado	P. Parcial	P. Acumulado	P. Parcial	P. Acumulado	P. Parcial	P. Acumulado
				0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1"	100.0	0.0	<b>0.0</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3/4"	95.0	5.0	<b>5.0</b>	56.3	56.3	56.0	56.0	55.8	55.8	55.5	55.5	55.2	55.2
1/2"	76.4	23.6	<b>18.6</b>	208.9	265.2	207.8	263.7	207.1	262.9	206.1	261.6	205.1	260.3
3/8"	68.0	32.0	<b>8.4</b>	94.8	360.0	94.3	358.1	94.0	356.9	93.6	355.2	93.1	353.4
Nº4	50.0	50.0	<b>18.0</b>	202.5	562.6	201.4	559.5	200.8	557.7	199.8	555.0	198.8	552.2
Nº8	36.0	64.0	<b>14.0</b>	157.5	720.1	156.7	716.2	156.2	713.9	155.4	710.4	154.6	706.9
Nº16	22.3	77.7	<b>13.7</b>	154.6	874.7	153.8	869.9	153.3	867.1	152.5	862.9	151.8	858.6
Nº30	15.5	84.5	<b>6.8</b>	76.1	950.8	75.7	945.6	75.5	942.6	75.1	938.0	74.7	933.3
Nº50	12.0	88.0	<b>3.5</b>	39.3	990.1	39.1	984.7	39.0	981.6	38.8	976.8	38.6	971.9
Nº100	7.3	92.7	<b>4.7</b>	52.5	1042.6	52.2	1036.9	52.0	1033.6	51.8	1028.6	51.5	1023.5
Nº200	5.0	95.0	<b>2.3</b>	26.3	1068.9	26.1	1063.1	26.0	1059.6	25.9	1054.5	25.8	1049.3
Filler	0	100.0	<b>5.0</b>	56.3	1125.1	56.0	1119.0	55.8	1115.4	55.5	1110.0	55.2	1104.5
<b>Peso Total=</b>				<b>1125.1</b>		<b>1119.0</b>		<b>1115.4</b>		<b>1110.0</b>		<b>1104.5</b>	

<b>Peso de limadura metálica=</b>	<b>6.00</b>	<b>12.00</b>	<b>18.00</b>	<b>24.00</b>	<b>30.00</b>
<b>Peso muestra pétreo=</b>	<b>1125.12</b>	<b>1119.00</b>	<b>1115.40</b>	<b>1110.00</b>	<b>1104.48</b>
<b>Peso asfalto=</b>	<b>68.88</b>	<b>69.00</b>	<b>66.60</b>	<b>66.00</b>	<b>65.52</b>
<b>Peso total material=</b>	<b>1200.00</b>	<b>1200.00</b>	<b>1200.00</b>	<b>1200.00</b>	<b>1200.00</b>

Fuente: Elaboracion propia

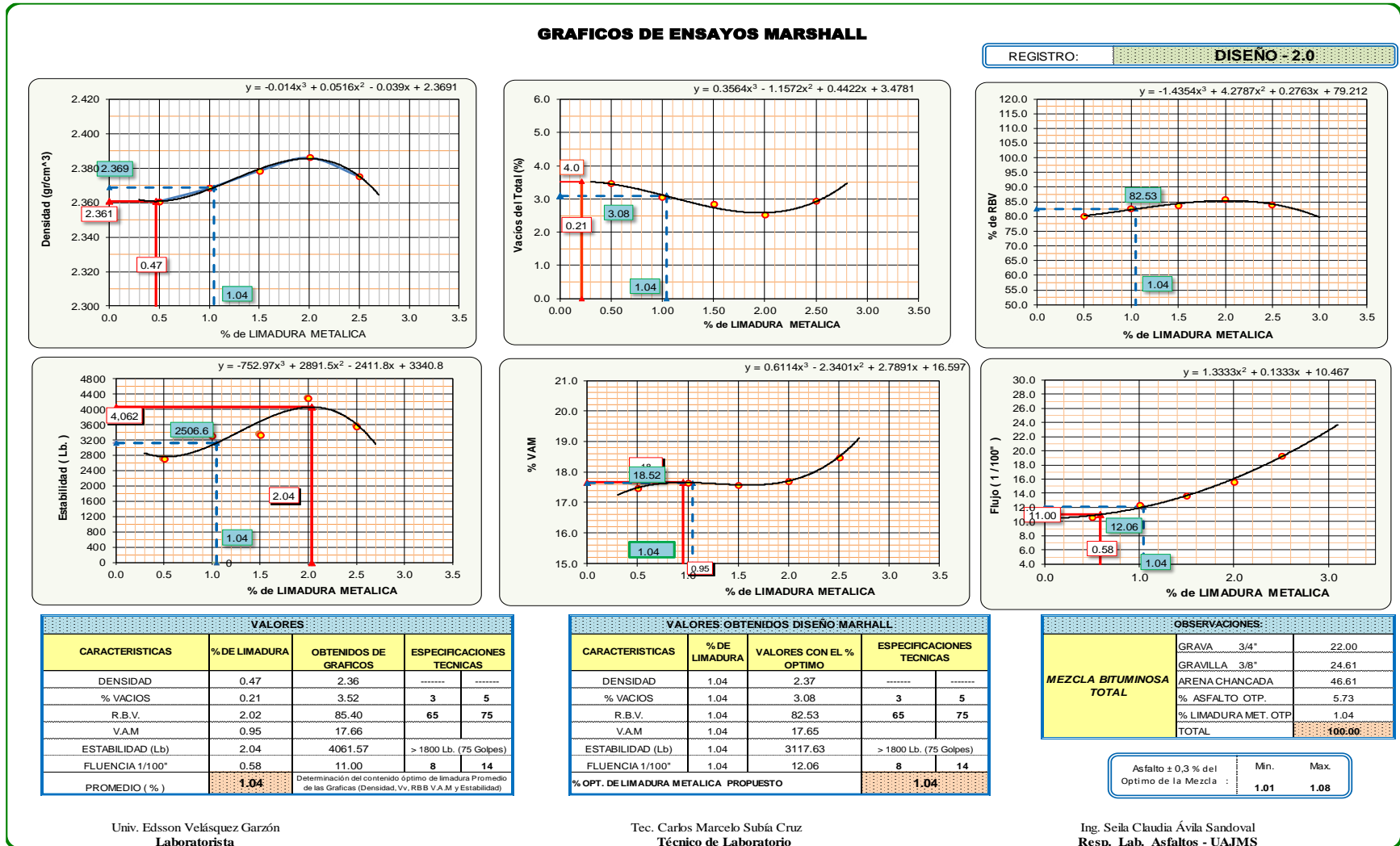
Tabla N° 4.8. Datos mezcla asfáltica adicionando limadura metálica diseño 2.0

LABORATORIO DE SUELOS, ASFALTOS Y HORMIGONES																									
<b>" DISEÑO DE MEZCLA AFALTICA EN CALIENTE // METODO MARSHALL " ADICIONANDO PORCENTAJES DE LIMADURA METALICA</b>																									
Proyecto: PROYECTO DE GRADO												Fecha: 01/08/2019				DISEÑO - 2.0									
Pesos Específicos (AASHTO T-100 , T-85)			% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20			DOSIFICACION					GRAVA		GRAVILLA		ARENA CHANCADA								
Mat. Retenido Tamiz N° 4			2.665	gr/cm <sup>3</sup>	50	Tipo de asfalto AASHTO M20			85-100					3/4"		3/8"		N°4							
Mat. Pasa Tamiz N° 4			2.700	gr/cm <sup>3</sup>	50	P. Especifico Total AASHTO T-228			1.005					% DE AGREGADOS :		24%		26%		50%					
P. Esp. Agregado Total (Gag.):			2.682	gr/cm <sup>3</sup>	100	BETUNEL			Peso especifico agregados (gr/cm <sup>3</sup> )					2.67		2.66		2.70							
N° GOLPES:			75	130 °C Compactación			ORIGEN AGREGADOS :					Material de Acopio Planta de Asfaltos - SEDECA - CHARAJA													
IDENTIFICACION	ALTURA BRIQUETA ( CM )	% de limadura metálica	% DE ASFALTO		PESO BRIQUETA EN EL AIRE (gr)	PESO BRIQUETA EN EL AIRE S.S.S. (gr)	PESO BRIQUETA SUMERGIDA EN AGUA (gr)	VOLUMEN BRIQUETA (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD BRIQUETA			% Vacios			ESTABILIDAD (Lb)					LECT. DIAL	FLUJO 1/100	MEDIA			
			BASE AGREGADO	BASE MEZCLA					REAL ( Dr. ) (gr/cm <sup>3</sup> )	PROMEDIO ( Dr.m.) (gr/cm <sup>3</sup> )	MAXIMA TEORICA (gr/cm <sup>3</sup> )	MEZCLA ( Vv )	AGREGADOS ( VAM )	LLENOS DE ASFALTO ( RBV )	LECT. DIAL	REAL	MEDIA	FACTOR DE CORRECCION ( ALTURA ) mm	MEDIA f.c.				CORREGIDA		
																								a	b
			%	%					%	-	-	-	-	-	-	-	-	%	%				%	mm.	libras
1	6.42	0.50	6.09	5.74	1192.4	1193.0	689.0	504.0	2.366						1345	2965.2		0.983			12	12.0			
2	6.53	0.50	6.09	5.74	1195.9	1196.1	690.0	506.1	2.363						1204	2654.3		0.956			11	11.0			
3	6.58	0.50	6.09	5.74	1191.6	1192.4	686.0	506.4	2.353	2.361	2.446	3.47	17.48	80.14	1277	2815.3	2811.6	0.947	0.962	2704.8	9	9.0	10.67		
4	6.45	1.00	6.10	5.75	1183.3	1183.9	684.0	499.9	2.367						1541	3397.3		0.975			13	13.0			
5	6.27	1.00	6.10	5.75	1192.4	1193.2	691.0	502.2	2.374						1488	3280.4		1.021			12	12.0			
6	6.37	1.00	6.10	5.75	1186.4	1186.9	685.0	501.9	2.364	2.368	2.443	3.05	17.66	82.72	1479	3260.6	3312.8	0.995	0.997	3302.8	12	12.0	12.33		
7	6.49	1.50	5.88	5.55	1194.5	1195.4	693.0	502.4	2.378						1614	3558.2		0.965			15	15.0			
8	6.43	1.50	5.88	5.55	1201.4	1201.5	697.0	504.5	2.381						1572	3465.6		0.980			14	14.0			
9	6.21	1.50	5.88	5.55	1197.4	1197.8	694.0	503.8	2.377	2.379	2.448	2.84	17.57	83.82	1379	3040.1	3354.7	1.037	0.994	3334.5	12	12.0	13.67		
10	6.58	2.00	5.82	5.50	1168.6	1169.4	680.0	489.4	2.388						2012	4435.7		0.947			17	17.0			
11	6.44	2.00	5.82	5.50	1149.3	1149.7	669.0	480.7	2.391						1997	4402.6		0.978			15	15.0			
12	6.35	2.00	5.82	5.50	1192.1	1192.9	692.0	500.9	2.380	2.386	2.448	2.52	17.71	85.79	1985	4376.1	4404.8	1.000	0.975	4294.7	15	15.0	15.67		
13	6.19	2.50	5.78	5.46	1190.8	1191.4	689.0	502.4	2.370						1458	3214.3		1.043			19	19.0			
14	6.46	2.50	5.78	5.46	1170.5	1171.3	678.0	493.3	2.373						1671	3683.9		0.973			18	18.0			
15	6.41	2.50	5.78	5.46	1195.1	1196.6	695.0	501.6	2.383	2.375	2.447	2.94	18.50	84.12	1714	3778.7	3559.0	0.985	1.000	3559.0	21	21.0	19.33		
OBSERVACIONES			ESPECIFICACIONES			3 - 5			65-75			≥ 1800 Lb.			8 - 14										

Fuente: Elaboracion propia



Gráfico N° 4.3 Gráficas ensayo Marshall de la mezcla asfáltica adicionando limadura metálica diseño 2.0



Fuente: Elaboración propia

Una vez ensayado los especímenes elaborados con los porcentajes propuestos de limadura metálica, se obtienen los resultados a través de los cuales se determinará en primera instancia el porcentaje óptimo de limadura metálica, se compara los resultados según los siguientes parámetros:

- Porcentaje de limadura metálica Vs vacíos de aire
- Porcentaje de limadura metálica Vs estabilidad
- Porcentaje de limadura metálica Vs flujo
- Porcentaje de limadura metálica Vs vacíos llenos de asfalto
- Porcentaje de limadura metálica Vs vacíos del agregado de mineral

Esta curva se genera a través de la comparación de los datos calculados y su curva de regresión, realizando la proyección de los valores normativos sobre dicha curva y su consecutiva definición del valor óptimo del parámetro del ensayo Marshall requerido.

Tabla N° 4.9. Valores con el porcentaje óptimo de mezcla asfáltica adicionando limadura metálica

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% de limadura	Valores con él % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad	1.04	2.37	-	-
% Vacíos	1.04	3.08	3	5
% R.B.V.	1.04	82.53	65	75
% V.A.M	1.04	17.65	-	-
Estabilidad (lbf)	1.04	3117.63	> 1800 lbf. (75 golpes)	
Fluencia 1/100"	1.04	12.06	8	14
% Óptimo de limadura metálica propuesto			1.04	

Fuente: Elaboración propia

### Relaciones y observaciones de resultados de los ensayos

Cuando los resultados de los ensayos se trazan en gráficas, como el gráfico N° 4.3 revelan ciertas tendencias en las relaciones entre el contenido de limadura metálica y las propiedades de la mezcla. A continuación, se enuncian tendencias que pueden observarse al estudiar las gráficas.

- La tendencia del porcentaje de vacíos tiende a disminuir a medida que se adiciona más contenido de limadura metálica, hasta un punto mínimo luego asciende.
- La tendencia del porcentaje de vacíos de agregado mineral (%V.A.M.) aumenta a medida que se adiciona más contenido de limadura metálica hasta un punto mínimo.
- La tendencia del porcentaje de vacíos llenos de asfalto (% R.B.V.) la curva tiende a ascender a medida que se adiciona más contenido de limadura metálica hasta un punto máximo luego con cualquier aumento tiende a descender-.
- La curva para densidad de la mezcla es similar a la curva de estabilidad excepto que la densidad máxima presenta a un contenido de limadura metálica ligeramente menor que el determina la máxima estabilidad.
- La curva de estabilidad asciende a medida que el contenido de Limadura aumenta, hasta un punto máximo, luego de este valor la estabilidad tiende a descender con cualquier aumento en el contenido de limadura metálica reciclada.
- Los valores de fluencia aumentan a medida que se adiciona más contenido de limadura metálica, solo tiende a ascender.

Tabla N° 4.10. Pesos y proporciones exactas para la mezcla adicionando limadura metálica diseñada

Briqueta de diseño Marshall		
Material	% con relación a la mezcla óptima	Pesos óptimos en gramos
Agregados	Grueso (3/4")	22.00
	Grueso (3/8")	24.61
	Fino	46.61
Ligante asfáltico		5.73
Limadura metálica		1.04
Total		100.00
		1200.00

Fuente: Elaboración propia

De los resultados detallados en la tabla N° 4.10, los pesos de agregados grueso 3/4" son 264.00 gr. agregado 3/8" es de 295.32 gr. como agregado fino 559.32 gr. respectivamente, corresponde a la estabilización granulométrica previamente realizada, el peso de ligante asfáltico es de 68.76 gr. corresponde a un valor óptimo de asfalto de

5.73 % del peso total de la mezcla, mientras que el peso de la limadura metálica es de 12.48 gr. corresponde a un valor de 1.04 % con respecto al peso total de la mezcla.

Cabe destacar que los valores obtenidos con la adición de limadura metálica cumplen con todos los parámetros normativos propuestos por la ASTM D 1559.

#### **4.4 DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA ADICIONANDO ALAMBRE METÁLICO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO**

El segundo material reciclado propuestos en esta investigación se debe incluir el mismo proceso Marshall de diseño de mezcla asfálticas en caliente, el material que se incluye es el alambre metálico de neumático fuera de uso, la cual será incluida como porcentaje en base al peso total de la mezcla en reemplazo del agregado pétreo, el porcentaje óptimo de ligante asfáltico permanece como variable y se verificara su incidencia con cada aumento del material reciclado metálico reciclado que se incluirá en la mezcla.

Dicho esto se denota que el objetivo de incluir este material en la mezcla asfáltica diseñada es el encontrar un porcentaje de alambre metálico óptimo, que permita mediante su inclusión en la mezcla de acuerdo al resultado, una mejora o perjuicio de la misma en cuanto a su eficiencia como material asfáltico comprobando esto mediante la evaluación de resultados que permitan diferenciar la variación de sus parámetros de estabilidad o flujo es beneficio o perjuicio de aquellos obtenidos en la mezcla asfáltica convencional.

Se realiza mezcla asfáltica adicionando porcentajes de 0.5 % al 2.5 % de alambre metálico aumentando en 0.5 % su valor de contenido es decir se elaboran mezclas de 0.5 %, 1.0 %, 1.5 %, 2.0 % y 2.5 % de contenido de alambre metálico con relación al peso total de la mezcla en reemplazo del agregado pétreo.

Imagen N° 4.18. Agregados pétreos adicionando alambre metálico de neumático fuera de uso



Fuente: Elaboración propia

Todos y cada uno de los procesos mencionados para llevar a cabo el método Marshall deben aplicarse de la misma manera en toda su extensión, luego de tener los porcentajes de agregados pétreo y la proporción óptima de ligante asfáltico con cada aumento del material modificador, que se observarán anexos el diseño 3.1, diseño 3.2, diseño 3.3, diseño 3.4, diseño 3.5. Se refleja en la tabla N° 4.12 que es la dosificación del diseño 3.0, que los valores del óptimo de cemento asfáltico con cada aumento de material reciclado metálico disminuyen.

Dosificación de mix de agregados con neumático fuera de uso

Se realizan de igual manera un total de 15 briquetas como exige el método para el ensayo y determinación de parámetros tanto volumétricos como de estabilidad- flujo usando los porcentajes ya mencionados median te las cuales se establecerán los gráficos de análisis y determinación de cantidades óptimas de alambre metálico e intervenir en la mezcla.

Imagen N° 4.19. Mezcla de agregados, ligante asfáltico y alambre metálico



Fuente: Elaboración propia

Imagen N° 4.20. Briqueta elaborada adicionando alambre metálico



Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 4.11. Dosificación de mezcla asfáltica adicionando alambre metálico de neumático fuera de uso diseño 3.0

**Dosificación diseño ensayo Marshall para alambre neumático fuera de uso diseño 3.0**

Porcentaje de alambre NFU				0.50%		1.00%		1.50%		2.00%		2.50%	
Porcentaje de agregados				93.45%		93.23%		92.78%		92.36%		91.92%	
Porcentaje ópt. de asfalto				6.05%		5.77%		5.72%		5.64%		5.58%	
TAMIZ	% Pasa	% Retenido	% Ret. Tamiz	P. Parcial	P. Acumulado	P. Parcial	P. Acumulado	P. Parcial	P. Acumulado	P. Parcial	P. Acumulado	P. Parcial	P. Acumulado
				0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1"	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3/4"	95.0	5.0	5.0	56.1	56.1	55.9	55.9	55.7	55.7	55.4	55.4	55.2	55.2
1/2"	76.4	23.6	18.6	208.2	264.3	207.8	263.7	206.8	262.4	205.8	261.2	204.8	260.0
3/8"	68.0	32.0	8.4	94.5	358.8	94.3	358.0	93.9	356.3	93.4	354.7	93.0	353.0
Nº4	50.0	50.0	18.0	201.9	560.7	201.4	559.4	200.4	556.7	199.5	554.2	198.5	551.5
Nº8	36.0	64.0	14.0	157.0	717.7	156.6	716.0	155.9	712.6	155.2	709.3	154.4	705.9
Nº16	22.3	77.7	13.7	154.1	871.8	153.7	869.7	153.0	865.5	152.3	861.6	151.6	857.5
Nº30	15.5	84.5	6.8	75.9	947.6	75.7	945.4	75.3	940.8	75.0	936.6	74.6	932.1
Nº50	12.0	88.0	3.5	39.2	986.8	39.1	984.5	38.9	979.8	38.7	975.3	38.6	970.7
Nº100	7.3	92.7	4.7	52.3	1039.1	52.2	1036.7	51.9	1031.7	51.7	1027.0	51.5	1022.1
Nº200	5.0	95.0	2.3	26.2	1065.3	26.1	1062.8	26.0	1057.7	25.9	1052.9	25.8	1047.9
Filler	0	100.0	5.0	56.1	1121.4	55.9	1118.8	55.7	1113.4	55.4	1108.3	55.2	1103.0
<b>Peso total=</b>				<b>1121.4</b>		<b>1118.8</b>		<b>1113.4</b>		<b>1108.3</b>		<b>1103.0</b>	

Peso de alambre de NFU=

Peso agregado pétreo=

Peso asfalto=

Peso total material=

<b>6.00</b>	<b>12.00</b>	<b>18.00</b>	<b>24.00</b>	<b>30.00</b>
<b>1121.40</b>	<b>1118.76</b>	<b>1113.36</b>	<b>1108.32</b>	<b>1103.04</b>
<b>72.60</b>	<b>69.24</b>	<b>68.64</b>	<b>67.68</b>	<b>66.96</b>
<b>1200.00</b>	<b>1200.00</b>	<b>1200.00</b>	<b>1200.00</b>	<b>1200.00</b>

Fuente: Elaboracion propia

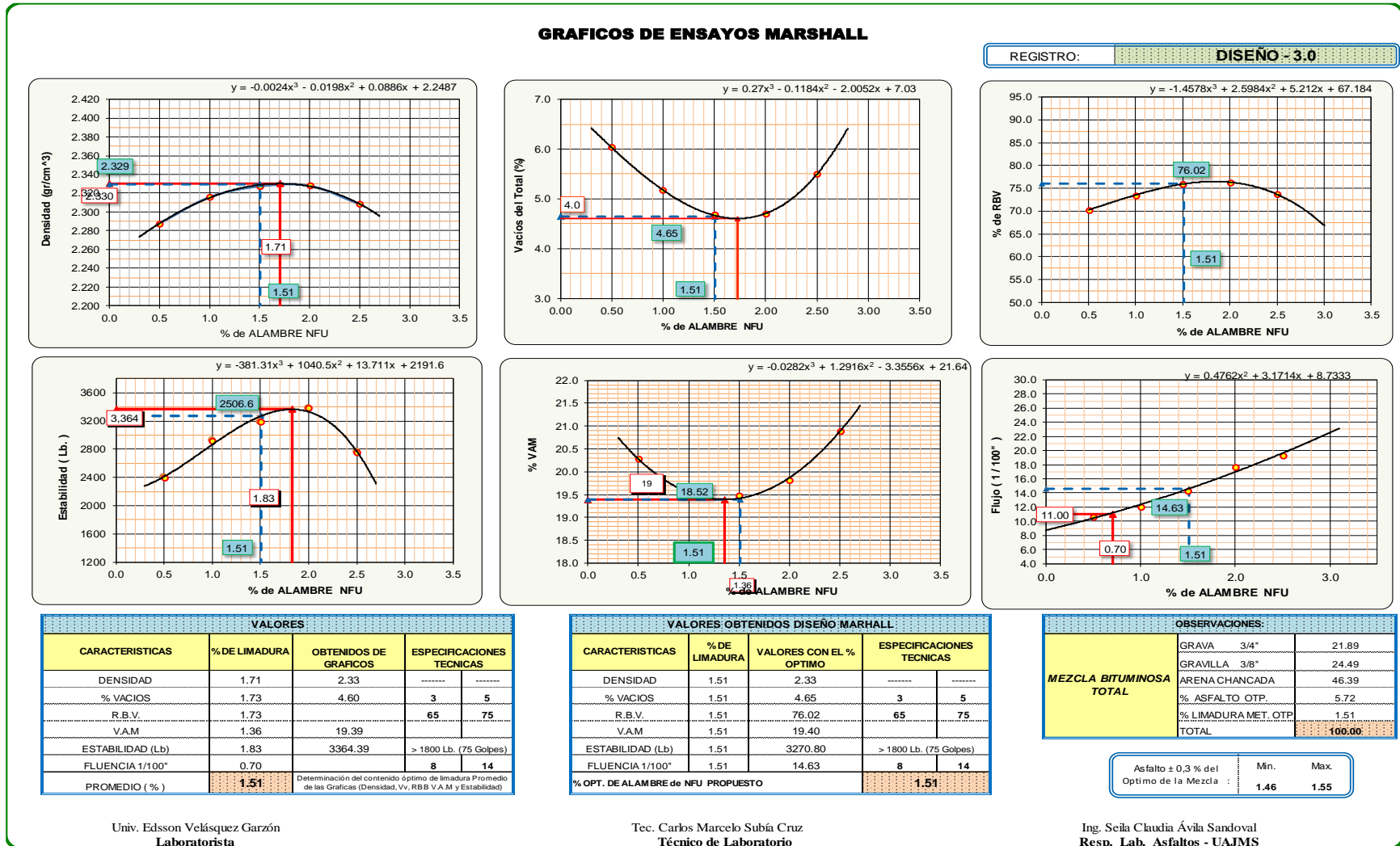
Tabla N° 4.12. Datos mezcla asfáltica adicionando alambre de neumático fuera de uso diseño 3.0

LABORATORIO DE SUELOS, ASFALTOS Y HORMIGONES																							
<b>" DISEÑO DE MEZCLA AFALTICA EN CALIENTE // METODO MARSHALL " ADICIONANDO PORCENTAJES DE ALAMBRE DE NFU</b>																							
Proyecto: PROYECTO DE GRADO												Fecha: 01/08/2019				DISEÑO - 3.0							
Pesos Especificos (AASHTO T-100 , T-85)			% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20			DOSIFICACION					GRAVA		GRAVILLA		ARENA CHANCADA						
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2.665	gr/cm <sup>3</sup>	50	Tipo de asfalto AASHTO M 20	85-100			% DE AGREGADOS :					3/4"	3/8"	N°4								
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2.700	gr/cm <sup>3</sup>	50	P. Especifico Total AASHTO T-228	1.005			Peso especifico agregados (gr/cm <sup>3</sup> )					24%	26%	50%								
P. Esp. Agregado Total (Gag.):	2.682	gr/cm <sup>3</sup>	100	BETUNEL			ORIGEN AGREGADOS :					2.67	2.66	2.70									
N° GOLPES: 75			130 °C Compactación			Material de Acopio Planta de Asfaltos - SEDECA - CHARAJA																	
IDENTIFICACION	ALTURA BRIQUETA ( CM )	% de alambre de NFU	% DE ASFALTO		PESO BRIQUETA EN EL AIRE (gr)	PESO BRIQUETA EN EL AIRE S.S.S. (gr)	PESO BRIQUETA SUMERGIDA EN AGUA (gr)	VOLUMEN BRIQUETA (cm3)	DENSIDAD BRIQUETA			% Vacios			ESTABILIDAD (Lb)					LECT. DIAL	FLUJO 1/100	MEDIA	
			BASE AGREGADO	BASE MEZCLA					REAL ( Dr. ) (gr/cm3)	PROMEDIO ( Drm.) (gr/cm3)	MAXIMA TEORICA (gr/cm3)	MEZCLA ( Vv )	AGREGADOS ( VAM )	LLENOS DE ASFALTO ( RBV )	LECT. DIAL	REAL	MEDIA	FACTOR DE CORRECCION ( ALTURA ) mm	MEDIA f.c.				CORREGIDA
			%	%					%	-	-	-	-	-	-	-	-	%	%				%
1	6.50	0.50	6.43	6.04	1192.8	1192.3	671.0	521.3	2.288						1135	2502.2		0.963			12	12.0	
2	6.28	0.50	6.43	6.04	1200.9	1202.3	675.0	527.3	2.277						1045	2303.8		1.019			10	10.0	
3	6.39	0.50	6.43	6.04	1195.4	1196.4	676.0	520.4	2.297	2.288	2.434	6.03	20.29	70.27	1112	2451.5	2419.2	0.990	0.991	2397.4	10	10.0	10.67
4	6.45	1.00	6.12	5.77	1192.4	1192.6	678.0	514.6	2.317						1365	3009.3		0.975			13	13.0	
5	6.38	1.00	6.12	5.77	1183.6	1186.9	674.0	512.9	2.308						1354	2985.0		0.993			12	12.0	
6	6.37	1.00	6.12	5.77	1186.4	1186.7	676.0	510.7	2.323	2.316	2.442	5.17	19.50	73.49	1301	2868.2	2954.2	0.995	0.988	2918.7	11	11.0	12.00
7	6.42	1.50	6.07	5.72	1199.1	1199.6	684.0	515.6	2.326						1451	3198.9		0.983			14	14.0	
8	6.39	1.50	6.07	5.72	1199.9	1201.7	685.0	516.7	2.322						1472	3245.2		0.990			15	15.0	
9	6.41	1.50	6.07	5.72	1199.5	1199.7	686.0	513.7	2.335	2.328	2.442	4.68	19.49	76.00	1473	3247.4	3230.5	0.985	0.986	3185.2	14	14.0	14.33
10	6.51	2.00	5.97	5.63	1190.0	1191.8	679.0	512.8	2.321						1574	3470.0		0.960			17	17.0	
11	6.38	2.00	5.97	5.63	1193.9	1195.6	678.0	517.6	2.307						1544	3403.9		0.993			18	18.0	
12	6.35	2.00	5.97	5.63	1191.4	1192.4	687.0	505.4	2.357	2.328	2.443	4.70	19.82	76.29	1563	3445.8	3439.9	1.000	0.984	3384.9	18	18.0	17.67
13	6.55	2.50	5.91	5.58	1187.2	1189.1	675.0	514.1	2.309						1344	2963.0		0.953			19	19.0	
14	6.28	2.50	5.91	5.58	1189.7	1195.6	681.0	514.6	2.312						1204	2654.3		1.019			20	20.0	
15	6.33	2.50	5.91	5.58	1194.3	1192.4	674.0	518.4	2.304	2.308	2.443	5.50	20.89	73.69	1235	2722.7	2780.0	1.005	0.992	2757.8	19	19.0	19.33
OBSERVACIONES			ESPECIFICACIONES			3-5			65-75			≥ 1800 Lb.			8-14								

Fuente: Elaboracion propia



Gráfico N° 4.4. Gráficas ensayo Marshall de mezcla asfáltica adicionando alambre de neumático fuera de uso diseño 3.0



Fuente: Elaboracion propia

Una vez ensayada los especímenes elaborados con los porcentajes propuestos con alambre de neumáticos fuera de uso, se obtienen los resultados a través de los cuales se determinará en primera instancia el porcentaje óptimo en la mezcla, se compara los resultados según los siguientes parámetros:

- Porcentaje con alambre de neumáticos fuera de uso Vs vacíos de aire
- Porcentaje con alambre de neumáticos fuera de uso Vs estabilidad
- Porcentaje con alambre de neumáticos fuera de uso Vs flujo
- Porcentaje con alambre de neumáticos fuera de uso Vs vacíos llenos de asfalto
- Porcentaje con alambre de neumáticos fuera de uso Vs vacíos del agregado de mineral

Esta curva se genera a través de la comparación de los datos calculados y su curva de regresión, realizando la proyección de los valores normativos sobre dicha curva y su consecutiva definición del valor óptimo del parámetro del ensayo Marshall requerido.

Tabla N° 4.13. Valores con el porcentaje óptimo de mezcla asfáltica adicionando alambre metálico de neumático fuera de uso

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% N.F.U óptimo	Valores con él % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad	1.51	2.33	-	-
% Vacíos	1.51	4.65	3	5
% R.B.V.	1.51	76.02	65	75
% V.A.M	1.51	19.40	-	-
Estabilidad (lbf)	1.51	3270.80	> 1800 lbf. (75 golpes)	
Fluencia 1/100"	1.51	14.63	8	14
% óptimo de alambre metálico propuesto			1.51	

Fuente: Elaboración propia

### Relaciones y observaciones de resultados de los ensayos

Cuando los resultados de los ensayos se trazan en gráficas, como en el gráfico N° 4.4 revelan ciertas tendencias en las relaciones entre el contenido de alambre de neumático fuera de uso y las propiedades de la mezcla. A continuación, se enuncian tendencias que pueden observarse al estudiar las gráficas.

- La tendencia de porcentaje de vacíos disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con más adición de porcentaje de alambre de neumático fuera de uso.
- La tendencia de porcentaje de vacíos de agregado mineral (%V.A.M.) disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con adición en el contenido de alambre de neumático fuera de uso.
- La tendencia el porcentaje de vacíos llenos de asfalto (% R.B.V.) aumenta hasta un valor máximo, y luego tiende a disminuir con aumentos en la adición contenido de alambre de neumático fuera de uso.
- La curva para densidad de la mezcla la tendencia va en aumento hasta un valor máximo, y luego tiende a disminuir con aumentos en la adición de contenido de alambre metálico
- La curva de estabilidad asciende a medida que el contenido de alambre aumenta, hasta un punto máximo, luego de este valor la estabilidad tiende a descender con cualquier aumento en el contenido de alambre metálico.
- Los valores de fluencia aumentan a medida que se adiciona más contenido de alambre de neumático fuera de uso

Tabla N° 4.14. Pesos y proporciones exactas para la mezcla adicionando alambre metálico de neumático fuera de uso diseñada

Briqueta de diseño Marshall			
Material		% con relación a la mezcla óptima	Pesos óptimos en gramos
Agregados	Grueso (3/4")	21.89	262.68
	Grueso (3/8")	24.49	293.88
	Fino	46.39	556.68
Ligante asfáltico		5.72	68.64
Neumático fuera de uso		1.51	18.12
Total		100.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

De los resultados detallados en la tabla N° 4.14, los pesos de agregados gruesos son 3/4" peso de 262.68 gr. agregado 3/8" 293.88 gr. como de agregado fino 556.68 gr. respectivamente, corresponde a la estabilización granulométrica previamente realizada,

el peso de ligante asfáltico es de 68.64 gr. corresponde a un valor óptimo de asfalto de 5.72 % del peso total de la mezcla, mientras que el peso del alambre de neumático fuera de uso es de 18.12 gr. corresponde a un valor de 1.51 % con respecto al peso total de la mezcla

#### **4.5. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS ENTRE MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS POR EL MÉTODO MARSHALL CONVENCIONAL Y USANDO MATERIALES RECICLADOS METÁLICOS**

En el presente capítulo se comparará los resultados obtenidos de las 3 mezclas asfálticas diseñadas se resume los resultados de cada una de ellas en la siguiente tabla.

Tabla N° 4.15. Resultados óptimos de la mezcla diseñada

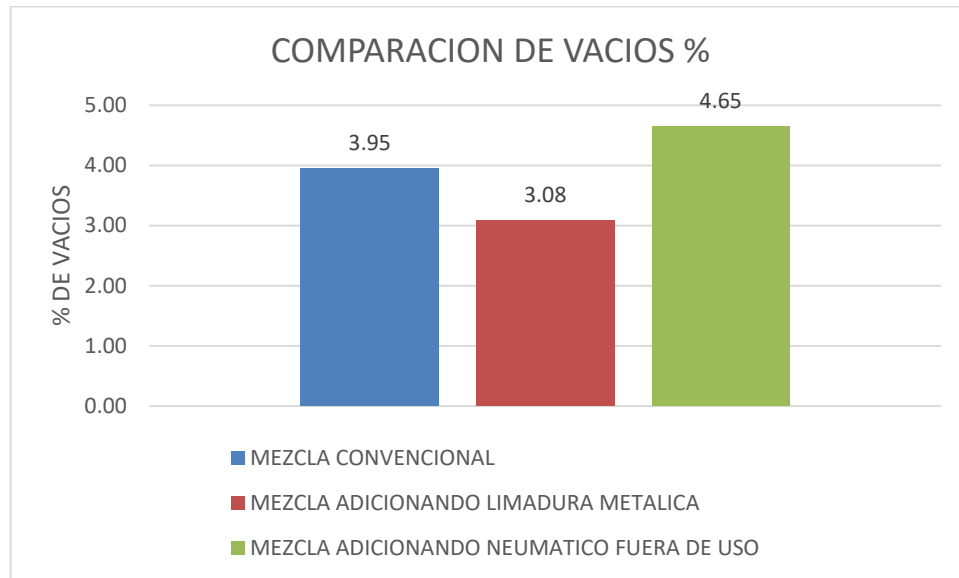
Resultados óptimos de las mezclas diseñadas			
Características	Mezcla convencional diseño 1.0	Mezcla adicionando limadura metálica diseño 2.0	Mezcla adicionando neumático fuera de uso diseño 3.0
Densidad	2.36	2.37	2.33
% Vacíos	3.95	3.08	4.65
R.B.V.	76.70	82.53	76.02
V.A.M	16.97	17.65	19.40
Estabilidad (lbf)	2702.30	3117.63	3270.80
Fluencia 1/100"	12.21	12.06	14.63

Fuente: Elaboración propia

Observando los resultados en la tabla N° 4.15, las características del ensayo Marshall en las mezclas asfálticas adicionando materiales reciclados hay un aumento y mejoras de valores a comparación a la mezcla asfáltica convencional, a continuación, se comparará cada una de estas características obtenidas por el método Marshall.

#### 4.5.1 Análisis de vacíos de aire de las mezclas diseñadas

Gráfico N° 4.5. Comparación de los resultados de porcentaje de vacíos de aire de las mezclas asfálticas diseñadas



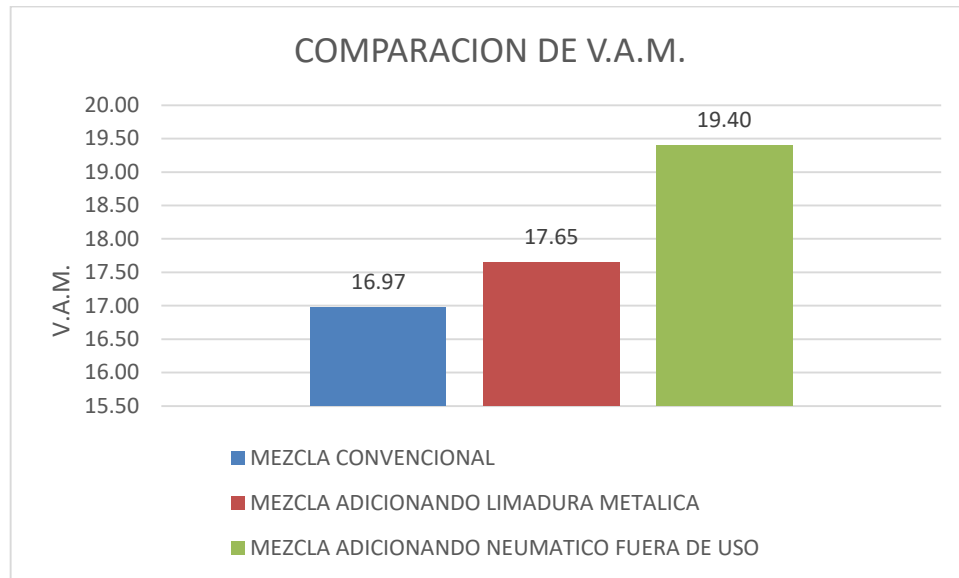
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados de porcentajes de vacíos de Marshall que por norma esta entre 3 % y 5 %, observamos en la gráfica que:

- Se observa que las mezcla diseñadas cumplen con el mínimo y máximo requeridos para porcentajes de vacíos para tráfico pesado de acuerdo a norma.
- los porcentajes de vacíos en la mezcla adicionando limadura metálica disminuyeron a comparación con el diseño convencional, debido a la inclusión de la limadura metálica conteniendo un peso específico de 2.23 gr/cm<sup>3</sup> alterando en si la mezcla y densidad teórica máxima por consecuencia debido a su peso específico y su contextura física granular metálico cerraron pasajes de vacíos.
- Los porcentajes de vacíos en la mezcla adicionando alambre metálico de neumático fuera de uso, aumentaron a comparación con el diseño convencional, debido a la inclusión de material reciclado conteniendo un peso específico de 5.4 gr/cm<sup>3</sup> alterando en si la mezcla y densidad teórica máxima por consecuencia debido a su peso específico y su contextura física abriendo pasajes de vacíos.

#### 4.5.2 Análisis de vacíos en el agregado mineral de las mezclas diseñadas

Gráfico N° 4.6. Comparación de los resultados de porcentaje de vacíos en el agregado mineral de las mezclas asfálticas diseñadas



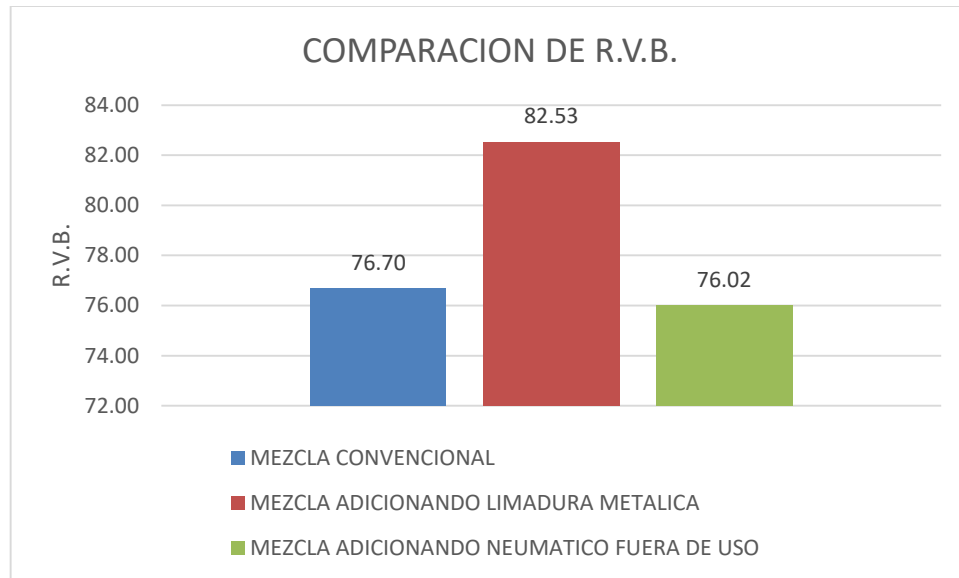
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados de porcentajes vacíos en el agregado mineral Marshall que por norma debe ser mínimo a 13 % de acuerdo al gráfico N° 4.6.

- Debido al tamaño máximo nominal del agregado que es 3/4" (19 mm.) se establece un mínimo de 13 %, observando que las mezclas diseñadas con el mínimo de porcentaje de vacíos en el agregado mineral cumplen con lo establecidos a norma.
- Los valores de VAM de la mezcla convencional muestra el porcentaje de espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos. A comparación de los valores de porcentaje de VAM de las mezclas diseñadas recicladas metálicas muestra un aumento por la razón de mayor espacio para la película de asfalto, aire y material reciclado.

### 4.5.3 Análisis de contenido de asfalto de las mezclas diseñadas

Gráfico N° 4.7. Comparación de los resultados contenidos de asfalto. con porcentajes óptimos de las mezclas asfálticas diseñadas



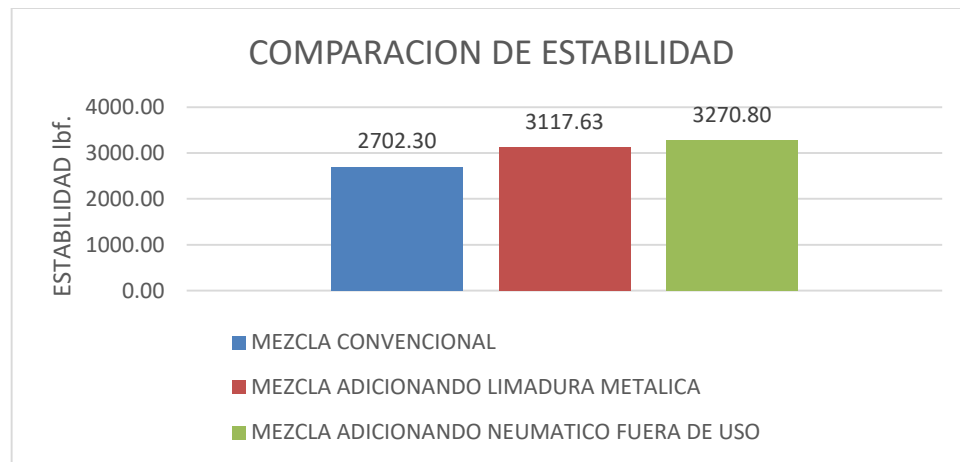
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados de porcentajes vacíos llenos de asfalto Marshall que por norma esta entre 65 % y 75 %, observamos en la gráfica que:

- Se observa que las mezcla diseñadas no cumplen con el mínimo y máximo requeridos para porcentajes de contenido de asfalto para tráfico pesado de acuerdo a norma.
- Los valores de R.B.V. de la mezcla convencional muestra el volumen efectivo de asfalto sin tomar en cuenta volumen de aire. A comparación de los valores de porcentaje de R.B.V. de las mezclas diseñadas recicladas metálicas muestra un aumento por la razón no solo es el valor del volumen efectivo de asfalto sino también el volumen efectivo de los materiales reciclados sin tomar en cuenta el volumen de aire.

#### 4.5.4 Análisis de estabilidad de las mezclas diseñadas

Gráfico N° 4.8. Comparación de los resultados de estabilidad con porcentajes óptimos de las mezclas asfálticas diseñadas



Fuente: Elaboración propia

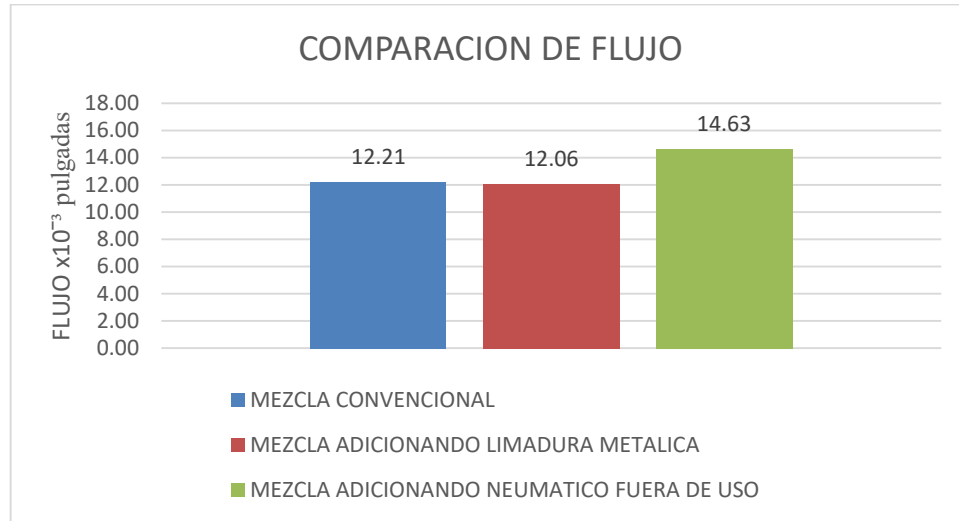
De acuerdo a los resultados estabilidad del Marshall que por norma es un mínimo de 1800 libras, observamos en la gráfica que:

- Se observa que las mezcla diseñadas cumplen con el mínimo de estabilidad requerida para tráfico pesado que es de 1800 lbf.
- La estabilidad en las mezclas adicionando los materiales reciclados es superior a la mezcla convencional mejorando sus características de resistencia.
- La estabilidad en la mezcla asfáltica adicionando limadura metálica aumento en un 15.37 % esto en comparación con la estabilidad de la mezcla convencional
- La estabilidad en la mezcla asfáltica adicionando fibra metálica de neumático fuera de uso aumento en un 21.04 % esto en comparación con la estabilidad de la mezcla convencional
- La estabilidad de la mezcla diseñada adicionando alambre de neumático fuera de uso es superior pero no siempre es buena que su capacidad de resistir desplazamientos y deformación sea demasiado elevada ya que se produce un producto rígido por lo tanto menos durable.



#### 4.5.5 Análisis de flujo de las mezclas diseñadas

Gráfico N° 4.9. Comparación de los resultados de flujo con porcentajes óptimos de las mezclas asfálticas diseñadas



Fuente: Elaboración propia

Observando los resultados de flujo de Marshall que por norma esta entre en  $8 \times 10^{-3}$ ” y  $14 \times 10^{-3}$ ”. para tráfico pesado observamos en la gráfica.

- Se observa que las mezcla diseñadas con porcentajes óptimos cumplen con el mínimo y máximo requerida para tráfico pesado excepto la mezcla diseñada adicionando alambre de neumático fuera de uso.
- El flujo de la mezcla adicionando limadura metálica es inferior a la mezcla convencional, pero se encuentra dentro de lo aceptable por lo que no se considera frágil.
- La mezcla adicionando alambre de neumático fuera uso los valores de flujo es superior a los dos anteriores diseños saliendo del rango determinado por la norma siendo este un diseño con la estabilidad más elevada y la fluencia, siendo así considerada un diseño rígido y plástica y tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

#### 4.6 ANÁLISIS DE COSTOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA DISEÑADAS

La mezcla asfáltica como producto final es resultado de un proceso sistemático en el cual interviene tanto recursos humanos como maquinarias y materiales para su elaboración y venta a gran escala.

Los valores de costo de chatarra y metales reciclados son obtenidos las estadísticas del INE y el diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en el departamento de Tarija realizado por el ministerio de medio ambiente y agua (MMAyA) explicados en el capítulo II de esta investigación. Donde se recolectan del total de residuos sólidos metálicos en la ciudad de Tarija un 2.75 %, es decir anualmente se recolecta en la ciudad de Tarija materiales de residuo metálico 1092.99 ton/año con costo anual de 293208.05 Bs/año con costo de material por re colectación de residuo metálico de 0.27 Bs/kg.

##### 4.6.1 Análisis de costo de la mezcla asfáltica convencional

Para determinar los volúmenes de cada material presentes en la mezcla asfáltica se debe tener en cuenta las cantidades óptimas determinadas en la tabla N° 4.6, además del valor de densidad máxima teórica para la correspondiente transformación de unidades de masa a unidades de volumen.

Cada una de las cantidades de material analizadas en el diseño de la mezcla asfáltica convencional diseño 1.0 en costo, son cantidades óptimas de agregados, así como también el ligante de cemento asfáltico.

Tabla N° 4.16. Volúmenes en 1 m<sup>3</sup> de mezcla asfáltica convencional

Material	%	gramos	cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
Ligante asfáltico 85-100	5.56	136458.91	135780.01	0.14
Grava (3/4")	22.29	547062.78	204892.43	0.20
Gravilla (3/8".)	24.93	611856.22	230021.13	0.23
Arena	47.22	1158919.00	429229.26	0.43
Total	100.00	2454296.90	999922.83	1.00

Fuente: Elaboración propia

A partir de estos valores se elabora el análisis de precio unitario ara la mezcla asfáltica tomando cuenta los valores de mano de obra, herramienta, equipos y materiales necesarios para llevar a cabo su elaboración, así como también las unidades en las cuales se proveen cada uno de los insumos.

El precio unitario esta expresado en moneda en bolivianos

Tabla N° 4.17. Análisis de precios unitarios, mezcla asfáltica convencional

Proyecto de Grado				Actividad N°	1.0
<b>Datos generales:</b>					
<b>Actividad:</b>	Mezcla asfáltica convencional				
<b>Cantidad:</b>	1				
<b>Unidad:</b>	m <sup>3</sup>				
<b>Moneda:</b>	Bs.				
<b>1. Materiales</b>					
N°	Descripción	Unidad	Rendimiento	Precio unitario	Costo total
1	Cemento asfáltico (85-100)	Kg.	136.46	10.70	1460.11
2	Grava 3/4" triturada	m <sup>3</sup>	0.20	130.00	26.64
3	Gravilla 3/8" triturada	m <sup>3</sup>	0.23	150.00	34.50
4	Arena	m <sup>3</sup>	0.43	125.00	53.65
5	Diésel	L	10.00	3.74	37.40
<b>Total de material</b>					<b>1612.30</b>
<b>2. Mano de obra</b>					
1	Ayudante de operador	Hra.	0.03	12.07	0.34
2	Capataz A	Hra.	1.80	17.95	32.31
3	Operador A	Hra.	0.82	17.95	14.72
4	Operador de equipo liviano	Hra.	0.08	15.37	1.26
5	Operador de planta	Hra.	0.09	23.19	2.09
6	Obrero A	Hra.	0.07	12.07	0.87
7	Chofer A	Hra.	0.00	15.37	0.02
<b>Subtotal mano de obra</b>					<b>51.60</b>
Cargas Sociales = (55% del subtotal de la mano de obra)				71.18	36.73
Impuestos IVA mano de obra = (14,94% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14.94	13.20
<b>Total mano de obra</b>					<b>101.52</b>
<b>3. Equipo, máquina y herramienta</b>					
1	Compactador rodillo liso	Hra.	0.04	303.85	10.63
2	Escoba mecánica autop.	Hra.	0.03	71.55	2.00
3	Planta calentamiento de asfalto	Hra.	0.09	965.23	86.87
4	Compactador de rodillo neumático tsp 10000	Hra.	0.08	332.81	27.96
5	Terminadora de asfalto	Hra.	0.08	669.06	50.18
6	Cargador frontal de ruedas	Hra.	0.00	421.29	0.04
7	Volquete >=12m3	Hra.	0.00	227.87	0.23
Herramientas =(5% del total de mano de obra)				5.00	5.08
<b>Total equipo, máquina y herramientas</b>					<b>182.99</b>
<b>4. Gastos generales y administrativos</b>					
Gastos generales y administrativos = 10% de 1+2+3				10.00	189.68
<b>Total gastos generales y administrativos</b>					<b>189.68</b>
<b>5. Utilidad</b>					
Utilidad= 10% de 1+2+3+4				10.00	208.65
<b>Total utilidad</b>					<b>208.65</b>
<b>6. Impuestos</b>					
Impuestos IT= 3,9% de 1+2+3+4+5				3.09	70.92
<b>Total de impuestos</b>					<b>70.92</b>
<b>Precio total de ITEM (1+2+3+4+5+6)</b>					<b>2366.07</b>

Fuente: Elaboración propia

#### 4.6.2 análisis de costo de la mezcla asfáltica adicionando con limadura metálica

Esta mezcla asfáltica requiere del uso de materiales que forma parte de una mezcla asfáltica convencional además de la adición de limadura metálica en su constitución.

Para determinar los volúmenes de cada material presentes en la mezcla asfáltica adicionando limadura metálica diseño 2.0, se debe tener en cuenta las cantidades óptimas determinadas en la tabla N° 4.10, además del valor de densidad máxima teórica para la correspondiente transformación de unidades de masa a unidades de volumen.

Tabla N° 4.18. Volúmenes en 1 m<sup>3</sup> de mezcla asfáltica adicionando con limadura metálica

Material	%	gramos	cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
Limadura metálica	1.04	25475.55	11424.01	0.01
Ligante asfáltico 85-100	5.73	140360.46	139662.15	0.14
Grava (3/4")	22.00	538905.77	201837.37	0.20
Gravilla (3/8")	24.61	602839.59	226631.42	0.23
Arena	46.61	1141745.35	422868.65	0.42
Total	99.99	2449326.70	1002423.59	1.00

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en la tabla N° 4.18 el precio se detalla para cada tipo de agregado por un metro cubico, y para ligante asfáltico se especifica por kilogramo en planta, así también para limadura metálica se especifica su valor por kilogramo de chatarra.

A partir de estos valores se elabora el análisis de precio unitario ara la mezcla asfáltica tomando cuenta los valores de mano de obra, herramienta, equipos y materiales necesarios para llevar a cabo su elaboración, así como también las unidades en las cuales se proveen cada uno de los insumos.

Tabla N° 4.19. Análisis de precios unitarios, mezcla asfáltica adicionando limadura metálica

Proyecto de Grado				Actividad N°	2.0
<b>Datos generales:</b>					
<b>Actividad:</b>	Mezcla asfáltica adicionando limadura metálica				
<b>Cantidad:</b>	1				
<b>Unidad:</b>	m <sup>3</sup>				
<b>Moneda:</b>	Bs.				
<b>1. Materiales</b>					
N°	Descripción	Unidad	Rendimiento	Precio unitario	Costo total
1	Limadura Metálica	Kg.	25.48	0.27	6.88
2	Cemento asfáltico (85-100)	Kg.	140.36	10.70	1501.86
3	Grava 3/4" triturada	m <sup>3</sup>	0.20	130.00	26.24
4	Gravilla 3/8" triturada	m <sup>3</sup>	0.23	150.00	33.99
5	Arena	m <sup>3</sup>	0.42	125.00	52.86
6	Diésel	L	10.00	3.74	37.40
<b>Total de material</b>					<b>1659.23</b>
<b>2. Mano de obra</b>					
1	Ayudante de operador	Hra.	0.03	12.07	0.34
2	Capataz A	Hra.	1.80	17.95	32.31
3	Operador A	Hra.	0.82	17.95	14.72
4	Operador de equipo liviano	Hra.	0.08	15.37	1.26
5	Operador de planta	Hra.	0.09	23.19	2.09
6	Obrero A	Hra.	0.07	12.07	0.87
7	Chofer A	Hra.	0.00	15.37	0.02
<b>Subtotal mano de obra</b>					<b>51.60</b>
Cargas Sociales = (55% del subtotal de la mano de obra)				71.18	36.73
Impuestos IVA mano de obra = (14,94% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14.94	13.20
<b>Total mano de obra</b>					<b>101.52</b>
<b>3. Equipo, máquina y herramienta</b>					
1	Compactador rodillo liso	Hra.	0.04	303.85	10.63
2	Escoba mecánica autop.	Hra.	0.03	71.55	2.00
3	Planta calentamiento de asfalto	Hra.	0.09	965.23	86.87
4	Compactador de rodillo neumático tsp 10000	Hra.	0.08	332.81	27.96
5	Terminadora de asfalto	Hra.	0.08	669.06	50.18
6	Cargador frontal de ruedas	Hra.	0.00	421.29	0.04
7	Volquete >=12m2	Hra.	0.00	227.87	0.23
Herramientas =(5% del total de mano de obra)				5.00	5.08
<b>Total equipo, máquina y herramientas</b>					<b>182.99</b>
<b>4. Gastos generales y administrativos</b>					
Gastos generales y administrativos = 10% de 1+2+3				10.00	194.37
<b>Total gastos generales y administrativos</b>					<b>194.37</b>
<b>5. Utilidad</b>					
Utilidad= 10% de 1+2+3+4				10.00	213.81
<b>Total utilidad</b>					<b>213.81</b>
<b>6. Impuestos</b>					
Impuestos IT= 3,9% de 1+2+3+4+5				3.09	72.67
<b>Total de impuestos</b>					<b>72.67</b>
<b>Precio total de ITEM (1+2+3+4+5+6)</b>					<b>2424.60</b>

Fuente: Elaboración propia

#### 4.6.3 Análisis de costo de la mezcla asfáltica adicionando con fibras metálicas de neumático fuera de uso

Esta mezcla asfáltica requiere del uso de materiales que forma parte de una mezcla asfáltica convencional además de la adición de alambres metálicos de neumático fuera de uso en su constitución

Para determinar los volúmenes de cada material presentes en la mezcla asfáltica adicionando alambre de neumático fuera de uso diseño 3.0, se debe tener en cuenta las cantidades óptimas determinadas en la tabla N° 4.14, además del valor de densidad máxima teórica para la correspondiente transformación de unidades de masa a unidades de volumen.

Tabla N° 4.20. Volúmenes En 1 m<sup>3</sup> de mezcla asfáltica adicionando con alambre de neumático fuera de uso

Material	%	gramos	cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
Alambre de neumático fuera de uso	1.51	37319.44	6911.01	0.01
Ligante asfáltico 85-100	5.72	141369.00	140665.67	0.14
Grava (3/4")	21.89	541008.29	202624.83	0.20
Gravilla (3/8")	24.49	605266.92	227543.96	0.23
Arena	46.39	1146522.36	424637.91	0.42
Total	100.00	2471486.00	1002383.37	1.00

Fuente: Elaboración Propia

A partir de estos valores se elabora el análisis de precio unitario para la mezcla asfáltica tomando cuenta los valores de mano de obra, herramienta, equipos y materiales necesarios para llevar a cabo su elaboración, así como también las unidades en las cuales se proveen cada uno de los insumos en el país.

Como se aprecia en la tabla N° 4.20. los precios se detallan para cada tipo de agregado por un metro cubico, y para ligante asfáltico se especifica por kilogramo en planta, así

también fibras metálicas de neumático fuera de uso se especifica su valor por kilogramo de chatarra.

Tabla N° 4. 21. Análisis de precios unitarios, mezcla asfáltica adicionando alambre metálico de neumático fuera de uso

Proyecto de Grado				Actividad N°	3.0
<b>Datos generales:</b>					
<b>Actividad:</b>	Mezcla asfáltica adicionando alambre de neumático fuera de uso				
<b>Cantidad:</b>	1				
<b>Unidad:</b>	m <sup>3</sup>				
<b>Moneda:</b>	Bs.				
<b>1. Materiales</b>					
N°	Descripción	Unidad	Rendimiento	Precio unitario	Costo total
1	Fibras metálicas de neumático fuera de uso	Kg.	37.32	0.27	10.08
2	Cemento asfáltico (85-100)	Kg.	141.37	10.70	1512.65
3	Grava 3/4" triturada	m <sup>3</sup>	0.20	130.00	26.34
4	Gravilla 3/8" triturada	m <sup>3</sup>	0.23	150.00	34.13
5	Arena	m <sup>2</sup>	0.42	125.00	53.08
6	Diésel	L	10.00	3.74	37.40
<b>Total de material</b>					<b>1673.68</b>
<b>2. Mano de obra</b>					
1	Ayudante de operador	Hra.	0.03	12.07	0.34
2	Capataz A	Hra.	1.80	17.95	32.31
3	Operador A	Hra.	0.82	17.95	14.72
4	Operador de equipo liviano	Hra.	0.08	15.37	1.26
5	Operador de planta	Hra.	0.09	23.19	2.09
6	Obrero A	Hra.	0.07	12.07	0.87
7	Chofer A	Hra.	0.00	15.37	0.02
<b>Subtotal mano de obra</b>					<b>51.60</b>
Cargas Sociales = (55% del subtotal de la mano de obra)				71.18	36.73
Impuestos IVA mano de obra = (14,94% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14.94	13.20
<b>Total mano de obra</b>					<b>101.52</b>
<b>3. Equipo, máquina y herramienta</b>					
1	Compactador rodillo liso	Hra.	0.04	303.85	10.63
2	Escoba mecánica autop.	Hra.	0.03	71.55	2.00
3	Planta calentamiento de asfalto	Hra.	0.09	965.23	86.87
4	Compactador de rodillo neumático tsp 10000	Hra.	0.08	332.81	27.96
5	Terminadora de asfalto	Hra.	0.08	669.06	50.18
6	Cargador frontal de ruedas	Hra.	0.00	421.29	0.04
7	Volquete >=12m2	Hra.	0.00	227.87	0.23
Herramientas =(5% del total de mano de obra)				5.00	5.08
<b>Total equipo, máquina y herramientas</b>					<b>182.99</b>
<b>4. Gastos generales y administrativos</b>					
Gastos generales y administrativos = 10% de 1+2+3				10.00	195.82
<b>Total gastos generales y administrativos</b>					<b>195.82</b>
<b>5. Utilidad</b>					
Utilidad= 10% de 1+2+3+4				10.00	215.40
<b>Total utilidad</b>					<b>215.40</b>
<b>6. Impuestos</b>					
Impuestos IT= 3,9% de 1+2+3+4+5				3.09	73.21
<b>Total de impuestos</b>					<b>73.21</b>
<b>Precio total de ITEM (1+2+3+4+5+6)</b>					<b>2442.62</b>

Fuente: Elaboración propia



#### 4.7 COMPARACIÓN DE COSTOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑADAS CON REFERENCIA AL COSTO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL

Comparando de acuerdo a los valores en los análisis de precios unitarios desarrollados en el apartado anterior, que se exponen en la siguiente tabla:

Tabla N° 4.22. Costo unitario de mezclas asfálticas

Material	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica adicionando limadura metálica	Mezcla asfáltica adicionando alambre de neumático fuera de uso
Costo Bs/m <sup>3</sup>	2366.07	2424.60	2442.62
Diferencia en bolivianos	-	58.53	76.56
Diferencia en (%)	-	2.47	3.24

Fuente: Elaboración propia

En la tabla N° 4.22 se aprecia los costos de las diferentes mezclas asfálticas aquellas que están desarrolladas de la siguiente investigación.

De acuerdo a este precio se puede interpretar la diferencia existe entre los precios definidos en esta investigación para cada una de las mezclas asfálticas desarrolladas.

La mezcla asfáltica adicionando con limadura metálica, presenta una diferencia de costos en bolivianos 58.53 Bs/m<sup>3</sup> esto significa un aumento del 2.47 % referente al costo de la mezcla asfáltica convencional.

La mezcla asfáltica adicionando alambre metálico de neumático fuera de uso, presenta una diferencia de costos en bolivianos 76.56 Bs/m<sup>3</sup> esto significa un aumento de precio de 3.24 % referente al costo de la mezcla asfáltica convencional.

Las mezclas asfálticas añadiendo material reciclado se redujeron en cantidad de material pétreo pero los costos finales de estos diseños fueron más elevados a comparación que el convencional, debido a que en las recicladoras cobran un costo por kilogramo de material reciclado.

#### 4.8 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS DISEÑOS ASFÁLTICOS MODIFICADOS

La validación y análisis de error se hará con los valores de estabilidad de los diseños 2.0 que es el diseño de mezcla asfáltica adicionando limadura metálica y el diseño 3.0 que es la mezcla asfáltica adicionando alambres de neumático fuera de uso, por el método de ajuste por el CHI<sup>2</sup>.

Tabla N° 4.23. Valores del ensayo Marshall de estabilidad de las mezclas modificadas con residuos metálicos reciclados

	Datos de mezcla asfáltica adicionando limadura metálica diseño 2.0	Datos de mezcla asfáltica adicionando alambre NFU diseño 3.0	Datos de mezcla asfáltica adicionando limadura metálica diseño 2.0	Datos de mezcla asfáltica adicionando alambre NFU diseño 3.0
	Ordenados de menor a mayor			
N°	Estabilidad (lb)	Estabilidad (lb)	Estabilidad (lb)	Estabilidad (lb)
1	2965.19	2502.22	2654.34	2303.81
2	2654.34	2303.81	2815.27	2451.52
3	2815.27	2451.52	2965.19	2502.22
4	3397.29	3009.28	3040.14	2654.34
5	3280.44	2985.03	3214.31	2722.68
6	3260.60	2868.18	3260.60	2868.18
7	3558.22	3198.87	3280.44	2962.98
8	3465.63	3245.17	3397.29	2985.03
9	3040.14	3247.38	3465.63	3009.28
10	4435.66	3470.04	3558.22	3198.87
11	4402.59	3403.90	3683.89	3245.17
12	4376.13	3445.79	3778.68	3247.38
13	3214.31	2962.98	4376.13	3403.90
14	3683.89	2654.34	4402.59	3445.79
15	3778.68	2722.68	4435.66	3470.04

Fuente: Elaboración propia

#### 4.8.1 Validación y análisis de error de mezcla asfáltica adicionando limadura metálica con valores estabilidad del diseño 2.0

Método de ajuste por  $\chi^2$  para la estabilidad de la mezcla asfáltica modificada con limadura metálica

##### Calculo del número de intervalos

$$NC=1+1.33* \ln (N)$$

Donde:

N= Número de datos

NC= Números de intervalos

$$NC= 4.60 \quad \text{redondeando } 5$$

##### Calculo de amplitud de cada intervalo

$$\Delta x = \frac{\text{Dato maximo} - \text{dato minimo}}{NC - 1} = 445.33 \quad \text{redondear } 446$$

$$\Delta x / 2 = 223$$

Intervalos de clase		Marcas de clase	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada
Inf .	Sup.				
2431.34	2877.34	2654.34	2.00	0.13	0.13
2877.34	3323.34	3100.34	5.00	0.33	0.47
3323.34	3769.34	3546.34	4.00	0.27	0.73
3769.34	4215.34	3992.34	1.00	0.07	0.80
4215.34	4661.34	4438.34	3.00	0.20	1.00
		Suma	15.00	1.00	

Media

$$x = \frac{\sum Xi * f}{N} = 3486.87$$

Desviación estándar

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2 * f_i}{N-1}} = 604.67$$

$$z = \frac{X - X_i}{S_x} =$$

Z Variable estandarizada de la distribución normal para x = límites de clase, el área bajo la curva de F(z) se encontrarán en ANEXO 5

Límite de clase	Z	Área bajo la curva F(z)	Frecuencia relativa	Frecuencia Abs (ei)		Frecuencia observada (Øi)
2431.338	-1.75	0.040	-	-	-	-
2877.338	-1.01	0.156	0.116	1.743	2.000	2.000
3323.338	-0.27	0.394	0.237	3.561	4.000	5.000
3769.338	0.47	0.681	0.287	4.308	4.000	4.000
4215.338	1.20	0.885	0.204	3.062	3.000	1.000
4661.338	1.94	0.974	0.089	1.334	2.000	3.000

### Cálculo de $\chi^2$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\emptyset_i - e_i)^2}{e_i} = \chi^2 = 2.08$$

### Cálculo de $X^2$

Grado de libertad

$$V = k - h - 1$$

Donde:

k= Número de intervalos de clase 5

h= Número de parámetros a estimar 2

h=2 – para Distribución normal

$h=3$ - para Distribución log- normal

$$V=5-2-1=2$$

### Nivel de significancia ( $\alpha$ )

$\alpha=5\% = 0,05$  la tabla de nivel de significancia se encuentra en ANEXO 5

$$\left. \begin{array}{l} V=2 \\ \\ \alpha=0,05 \end{array} \right\} X^2= 5.991$$

### Criterio de Decisión

$Xc^2 \leq X^2$  El ajuste es bueno

$Xc^2 > X^2$  El ajuste es malo

$2.08 \leq 5,99$  “ok” buen ajuste

### Cálculo del Nivel de Confianza

Media y desviación estándar de los valores no agrupados

Media

$$x = \frac{\sum Xi}{N} = 3488.56$$

Desviación estándar

$$Sx = \sqrt{\frac{\sum (Xi - X)^2}{N-1}} = 563.85$$

Para la resistencia mayor

$$Z = \frac{X_{max} - X}{S_x} = 1.68$$

z es una variable estandarizada para x = límites de clase ir a la tabla de distribución para encontrar F(z) F1= 0.9535

Para la resistencia menor

$$Z = \frac{X_{min} - X}{S_x} = -1.48$$

$$F2 = 0.0694$$

### Nivel de confianza

$$NC = F1 - F2 = 0.9535 - 0.0694 = 0.8841 * 100 = 88.41 \%$$

Cálculo del límite superior e inferior

Obtención de Z con NC= 0,88

$$F(z) = 0.884 + 0.06 = 0.94 \text{ Dato para entrar a tabla de distribución}$$

Resultado de tabla Z=1.56

Entonces

$$X = \bar{X} \pm E \quad E = Z * S_x$$

$$E = Z * S_x$$

$$E = 1.56 * 563.85 = 879.61$$

$$X = \bar{X} \pm E$$

$$X = 3488 \pm 879$$

Cálculo en porcentaje de límite superior e inferior

$$E_p = E / X * 100 \quad E_p = \frac{389.15}{2424.07} * 100 =$$

$$E_p = 25.20 \%$$

El resultado de la estadística nos muestra que los datos de la mezcla asfáltica modificada adicionando limadura metálica tienen una confiabilidad de 88.41 % y un error porcentual del aparato Marshall de 25.2 %.

#### 4.8.2 Validación y análisis de error de mezcla asfáltica adicionando con fibras metálicas de neumático fuera de uso con valores estabilidad del diseño 3.0

Método de ajuste por  $\chi^2$  para la estabilidad de la mezcla asfáltica modificada con alambre de neumático fuera de uso.

##### Calculo del número de intervalos

$$NC = 1 + 1.33 * \ln(N)$$

Donde:

N= Número de datos

NC= Números de intervalos

$$NC = 4.60 \text{ redondeando } 5$$

##### Calculo de amplitud de cada intervalo

$$\Delta x = \frac{\text{Dato maximo} - \text{dato minimo}}{NC - 1} = 291.59 \text{ redondear } 292$$

$$\Delta x / 2 = 146$$

Intervalos de clase		Marcas de clase	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada
Inf .	Sup.				
2157.81	2449.81	2303.81	1.00	0.07	0.07
2449.81	2741.81	2595.81	4.00	0.27	0.33
2741.81	3033.81	2887.81	4.00	0.27	0.60
3033.81	3325.81	3179.81	3.00	0.20	0.80
3325.81	3617.81	3471.81	3.00	0.20	1.00
		Suma	15.00	1.00	

Media

$$\bar{x} = \frac{\sum Xi \cdot f}{N} = 2946.21$$

Desviación estándar

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (Xi - \bar{x})^2 \cdot fi}{N-1}} = 369.35$$

$$z = \frac{x - Xi}{S_x} =$$

Z Variable estandarizada de la distribución normal para x = límites de clase, el área bajo la curva de F(z) se encontrarán en ANEXO 5

Límite de clase	Z	Área bajo la curva F(z)	Frecuencia relativa	Frecuencia Abs (ei)		Frecuencia observada (Øi)
2157.807	-2.13	0.017	-	-	-	-
2449.807	-1.34	0.090	0.074	1.103	1.000	1.000
2741.807	-0.55	0.291	0.201	3.017	3.000	4.000
3033.807	0.24	0.595	0.304	4.554	5.000	4.000
3325.807	1.03	0.849	0.254	3.806	4.000	3.000
3617.807	1.82	0.966	0.117	1.757	2.000	3.000

**Cálculo de  $\chi^2$**

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\emptyset_i - e_i)^2}{e_i} = \chi^2 = 1.28$$

**Cálculo de  $X^2$**

Grado de libertad

$$V = k - h - 1$$

Donde:

k= Número de intervalos de clase

5



$h$ =Número de parámetros a estimar 2

$h=2$  – para Distribución normal

$h= 3$ - para Distribución log- normal

$$V=5-2-1=2$$

### Nivel de significancia ( $\alpha$ )

$\alpha=5\% = 0,05$  la tabla de nivel de significancia se encuentra en ANEXO 5

$$\left. \begin{array}{l} V= 2 \\ \\ \alpha=0,05 \end{array} \right\} X^2= 5.991$$

### Criterio de Decisión

$X_c^2 \leq X^2$  El ajuste es bueno

$X_c^2 > X^2$  El ajuste es malo

1.28  $\leq$  5,99 “ok” buen ajuste

### Cálculo del Nivel de Confianza

Media y desviación estándar de los valores no agrupados

Media

$$x = \frac{\sum X_i}{N} = 2964.75$$

Desviación estándar

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (X_i - x)^2}{N-1}} = 375.48$$

Para la resistencia mayor

$$Z = \frac{X_{max} - X}{S_x} = 1.35$$

z es una variable estandarizada para x = límites de clase ir a la tabla de distribución para encontrar F(z) F1= 0.9115

Para la resistencia menor

$$Z = \frac{X_{min} - X}{S_x} = -1.76$$

$$F2 = 0.0392$$

### Nivel de confianza

$$NC = F1 - F2 = 0.9115 - 0.0392 = 0.87 * 100 = 87.23 \%$$

Cálculo del límite superior e inferior

Obtención de Z con NC= 0,87

$$F(z) = 0.87 + 0.065 = 0.94 \text{ Dato para entrar a tabla de distribución}$$

Resultado de tabla Z=1.56

Entonces

$$X = \bar{X} \pm E \quad E = Z * S_x$$

$$E = Z * S_x$$

$$E = 1.56 * 375.48 = 585.75$$

$$X = \bar{X} \pm E$$

$$X = 2964.75 \pm 585.75$$

Cálculo en porcentaje de límite superior e inferior

$$E_p = E/X * 100 \quad E_p = \frac{585.75}{2964.75} * 100 =$$

$$E_p = 19.76 \%$$

El resultado de la estadística nos muestra que los datos de la mezcla asfáltica modificada adicionando alambre de neumático fuera de uso tienen una confiabilidad de 87.23 % y un error porcentual del aparato Marshall de 19.76 %.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

##### 5.1.1 Conclusiones

- Para el diseño de una mezcla asfáltica se verificó que la caracterización de los agregados y el cemento asfáltico cumple con las normas y especificaciones técnicas para el diseño de una mezcla asfáltica.
- En la mezcla asfáltica convencional se realizó la dosificación y la compactación de las briquetas variando porcentajes de 4.5 % al 6.5 % de ligante asfáltico aumentado en 0.5 % su valor de contenido, para obtener el porcentaje óptimo de contenido de asfalto cuyo valor es de 5.56 %, para una mezcla convencional.
- En la mezcla asfáltica adicionando los materiales metálicos reciclados, se realizó la dosificación y la compactación de las briquetas variando porcentajes de 4.5 % al 6.5 % de ligante asfáltico aumentado en 0.5 % su valor de contenido del material de residuo metálico reciclado, para obtener el porcentaje óptimo de contenido de asfalto, para usar este porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica adicionando los materiales reciclados. Concluyendo que a medida que se aumenta el material metálico reciclado disminuye el porcentaje óptimo de cemento asfáltico.
- en la mezcla asfáltica adicionando limadura metálica se realizó la dosificación y la compactación de las briquetas variando porcentajes de 0.5 % al 2.5 % de limadura metálica aumentando en 0.5 % su valor de contenido, para obtener el porcentaje óptimo de contenido de limadura metálica cuyo valor es de 1.04 %.
- La limadura metálica adicionando a la mezcla Marshall produjo una composición aún más cerrada en los pasajes de vacíos que la convencional pero dentro del rango de lo aceptable según norma, logra un rango de aumento de estabilidad de 3117.63 lbf. mejorando en un 15.37 % con respecto al diseño convencional mejorando así la resistencia y una disminución de flujo con valor de  $12.06 \times 10^{-3}$ . en un rango aceptable sin sobrepasar los límites propuestos por tráfico pesado. Se recomienda este diseño de mezcla asfáltica adicionando limadura metálica por cumplir con las características Marshall, con un elevamiento económico en comparación a la mezcla

asfáltica convencional, pero de manera justificable al mejorar las características de Marshall.

- Mientras que en la mezcla asfáltica adicionando alambre de neumático fuera de uso, se realizó la dosificación y la compactación de las briquetas variando porcentajes de 0.5 % al 2.5 % de alambre de neumático fuera de uso aumentando en 0.5 % su valor de contenido, para obtener el porcentaje óptimo de contenido de alambre de neumático fuera de uso cuyo valor es de 1.51 %.
- El alambre de neumático fuera de uso adicionando a la mezcla Marshall produjo una composición aún más abierta en los pasajes de vacíos que la convencional pero dentro del rango de lo aceptable según norma, la estabilidad de la mezcla aumenta considerablemente de manera positiva en comparación a la mezcla convencional mejorando así la resistencia de valor de 3270.8 lbf, en un aumento de 21.04 % pero en valores de flujo fueron de manera negativa sobrepasando el rango de límites propuesto provocó un ascenso de flujo de valor  $14.63 \times 10^{-3}$  concluyendo que es un diseño rígido y plástico. No se recomienda este diseño de mezcla asfáltica adicionando alambre metálico de neumático fuera de uso al no cumplir los límites de las características del ensayo Marshall y un elevamiento económico considerable en comparación a la mezcla asfáltica convencional.
- Algo importante a destacar es el hecho de ser materiales metálicos reciclados para las mezclas asfálticas en caliente, lo que permite que su uso sea amigable con el medio ambiente, siendo los mismos reutilizados y no desechados a los botadores como se lo hace comúnmente, sin embargo, en la tabla N° 4.22. se puede notar la diferencia de costos de mezcla asfáltica diseñadas en este proyecto de investigación, con un costo superior mezcla adicionando materiales reciclados que, al costo de mezcla asfáltica convencional, el costo es justificado por el aumento de valores y mejoras en las características en el ensayo Marshall.

Tabla N° 4.22. Costo unitario de mezclas asfálticas

Material	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica adicionando limadura metálica	Mezcla asfáltica adicionando alambre de neumático fuera de uso
Costo (Bs.) / m <sup>3</sup>	2366.07	2424.60	2442.62
Diferencia en bolivianos	-	58.53	76.56
Diferencia en (%)	-	2.47	3.24

### 5.1.2 Recomendaciones

- Seguir los procedimientos de seguridad antes de realizar la dosificación y el compactado de la mezcla asfáltica, utilizando guantes, barbijos y lentes de seguridad para que los gases que emita la mezcla no sean perjudiciales para la salud.
- Calentar a temperatura constante los agregados pétreos, ligante asfáltico y las fibras metálicas y los moldes de las briquetas, para obtener mejores resultados.
- Lectura a cada instante y cuidar la temperatura que no disminuya y exceda los 140 °C para lograr una mezcla homogénea para evitar que se quemé el asfalto y pierda sus propiedades físicas y mecánicas a la hora de la dosificación de la mezcla.
- Por el flujo resultante en la mezcla modificada con alambre de NFU igual a 14.63 (0,01”), que sobrepasan el límite superior de 14, se recomienda que sea utilizadas en vías de tráfico mediano en donde el rango de variación del flujo es de 8 a 16 (0.01”)
- En nuestro país, la implantación de plantas recicladoras está retrasada, lo que implica que, desde un punto de vista económico, conseguir la extracción de materiales reciclados sea muy caro, se debe instar a los organismos gubernamentales a favorecer dicha implantación apoyando a las empresas interesadas de todas las formas posibles, incluyendo la instauración de normativa en relación a los proyectos de carreteras que obliguen al uso y empleo de materiales metálicos reciclados en la fabricación de mezclas asfálticas, siguiendo la línea de otros países, lo que causará el

descenso de los precios finales, haciéndolo competitivo para su empleo en la construcción de carreteras

- Siempre se desea que haya una mejora continua en la investigación realizada, por lo tanto, se recomienda a futuros investigadores que tengan interés en el tema, la complementación de ensayos dinámicos a la mezcla, en especial el ensayo de ahuellamiento mediante la rueda cargada, ya que este permite efectuar medidas adicionales para estudiar tasas de compactación y deformación plástica de mezclas bituminosas de una o varias capas. El ahuellamiento es un tipo defecto o falla que se produce en pavimentos asfálticos y consiste en una depresión canalizada en la huella de circulación de vehículos, de allí la necesidad de conocer más a fondo estos factores de gran importancia para diseño de mezclas asfálticas en caliente adicionando materiales reciclados.
- Se puede recomendar propagación del uso de diferentes tipos de materiales con los cuales se pueda beneficiar al desarrollo de nuestro país con nuevas tendencias de construcción y diversos enfoques hacia una nueva cultura del reciclaje.