

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.Introducción

La investigación dirigida a la innovación de técnicas de producción de mezclas asfálticas en tibio aplicables en la construcción de carreteras en nuestro medio, es considerada de gran importancia en la actualidad, debido a que el pavimentado de vías es de primera necesidad para el desarrollo de las regiones del país mediante la interconexión de las mismas y a la vez con otros países.

Un aspecto de vital importancia para nuestro planeta, el ser humano y la sociedad es el de tratar de producir la menor cantidad de contaminación dentro del proceso de pavimentación de vías, por lo tanto, se pone un énfasis especial a la investigación sobre la producción de mezclas asfálticas que buscan una reducción de las emisiones nocivas al medio ambiente, mediante técnicas alternativas novedosas en comparación a las utilizadas comúnmente hasta la actualidad.

Para tal efecto se debe tener conocimiento de los novedosos métodos de producción de mezclas asfálticas tibias, estudios de los materiales aptos para ser utilizados en las mismas; así como también es necesario conocer la proveniencia y disponibilidad en la región de los elementos componentes necesarios para la elaboración de la mezcla asfáltica. Además, se debe tener conocimiento específico y detallado de la metodología de producción de mezclas asfálticas tibias, siguiendo las normativas vigentes y tomando como referencia trabajos similares realizados en esta área de estudio.

En Bolivia se cuenta con poca información sobre la aplicación de aditivos con nanotecnología para la mejora de producción de mezclas asfálticas tibias o mezclas asfálticas convencionales.

Por tanto y para bien de nuestro ecosistema, economía y procesos innovativos es que la aplicación de este tipo de estudios puede otorgar soluciones a mediano y corto plazo para estos importantes aspectos.

Hoy por hoy gracias al actual avance tecnológico en busca soluciones de problemática mundial y de la optimización de características propias de cualquier mezcla asfáltica o

sus componentes, es que empresas mundialmente reconocidas han desarrollado “aditivos” para lograr dichas mejoras.

Zycotherm (producido por la empresa Zydex) es el nombre de uno de los aditivos que se pretende, sea uno de los que mejoren las condiciones tanto de producción como de puesta en obra de las mezclas asfálticas el objeto de estudio del presente trabajo.

La presente investigación tiene como finalidad esquematizar el uso del aditivo líquido Zycotherm, (dosificación, principales beneficios, ventajas y si existiesen desventajas) dentro de su incorporación en mezclas asfálticas producidas en tibio, para dicho efecto, se han obtenido áridos provenientes de la procesadora perteneciente a SEDECA Tarija, extraídos del Río Camacho (zona/comunidad Charaja), así como también el cemento asfáltico 85/100 procedencia argentina dotado por la posta del GAMT.

1.2.Antecedentes

A partir de la contaminación ambiental en el mundo, se ha buscado regular las emisiones de gases contaminantes, generando de esta manera la concientización y el cuidado sostenible del medio ambiente, para esto se introduce el concepto de mezclas asfálticas “tibias” con nuevas técnicas e investigaciones conocidas internacionalmente como WMA (Warm Mix Asphalt) o se las llamará MAT (Mezclas Asfálticas Tibias), mediante las cuales se busca reducir las altas temperaturas utilizadas en las mezclas tradicionales y usadas en el medio llamadas como HMA (Hot Mix Asphalt) o también llamadas MAC (Mezclas Asfálticas Calientes).

El método MAT permite la disminución del consumo de energía utilizada en el proceso de producción de las mezclas asfálticas por consiguiente la reducción de las emisiones contaminantes en la fase de producción tanto como en la fase de colocación y que pueden ser perjudiciales para la salud ocupacional de las personas involucradas en construcciones viales.

Al hablar de mezclas asfálticas tibias y la existencia de varios métodos para la producción de este tipo de mezclas (WMA) existen métodos que buscan reducir la viscosidad del asfalto a una temperatura determinada, permitiendo de esta manera la fluidez del asfalto

a una menor temperatura y consiguiendo así que el agregado sea cubierto completamente a esa temperatura menor.

En relación a las mezclas asfálticas tibias existen varias investigaciones realizadas al respecto, en donde en varios países se concentran en encontrar mediante tecnología, componente o productos útiles para modificar los componentes del asfalto y así producir una mezcla tibia, entonces con estas investigaciones se ha buscado un material alternativo que sea un modificador del asfalto, en este caso se trabajará con el aditivo Zycotherm como agente reductor de la viscosidad en el asfalto para trabajar la mezcla a una menor temperatura que las mezclas calientes convencionales, para posteriormente evaluar sus características de desempeño y comparar ambos tipos de mezclas asfálticas.

Durante años en la práctica de la construcción de carreteras, se ha buscado minimizado los impactos ambientales negativos, por medio de nuevos procesos y mejores desarrollos tecnológicos en la elaboración de mezclas asfálticas, buscando generar nuevas metodologías de construcción de vías y así garantizar la fabricación de mezclas asfálticas menos contaminantes.

Actualmente la industria de la construcción, se ha orientado en la reducción de las temperaturas en la producción y aplicación de las mezclas asfálticas. Normalmente la producción y aplicación de las mezclas asfálticas en caliente requiere que los materiales se calienten entre 140°C y 180°C.

El comienzo de los estudios experimentales de la aplicación de las mezclas asfálticas tibias corresponde a los realizados en los países de Europa como Noruega, Alemania y Francia. Los resultados obtenidos de estas mezclas en laboratorio y a corto plazo en campo muestran que las mezclas tibias adquieren un comportamiento igual o superior al de las mezclas convencionales, por consiguiente, no se tienen resultados en campo a largo plazo debido a su reciente empleo.

Basados en los antecedentes europeos, los Estados Unidos empezaron a utilizar estas tecnologías de mezclas tibias en las diferentes vías de los estados de este país. Así mismo en Argentina iniciaron con los trabajos desarrollados en laboratorios y en campo, con el fin de que este tipo de mezcla empiece a emplearse rápidamente en las distintas vías del

país. Las mezclas tibias son un conjunto de tecnologías desarrolladas en Europa durante el Tratado de Kyoto y la Comunidad Económica Europea como una respuesta para disminuir los gases del efecto invernadero mitigando estos problemas ambientales causados por la humanidad.

Trabajar mezclas asfálticas a temperaturas inferiores de las convencionales ha sido un objetivo de la industria durante muchos años. Con la aparición de las emulsiones catiónicas en los años '50 se desarrollaron también la tecnología de las denominadas mezclas en frío (cold mixes). Las mismas tuvieron particular impulso en Europa (Francia y España) en variadas formas tales como grava emulsiones, mezclas densas e inclusive abiertas o drenantes, éstas últimas mediante el desarrollo de las emulsiones modificadas. Sin embargo, uno de puntos pendientes a resolver fue encontrar equivalencia de prestaciones mecánicas similares a las mezclas en caliente convencionales.

En la India la industria ha desarrollado y creado tecnologías químicas sostenibles para los sectores de la construcción y de las carreteras. Nanotecnología para la construcción y mantenimiento de carreteras resistentes a la humedad y de larga duración a través de una adaptación química denominada organosilano. El enlace químico entre los agregados y el asfalto elimina la humedad y evita el daño de las capas asfálticas. Dentro de los productos de esta industria existen los aditivos que aumentan la resistencia a la humedad, mejoran la adherencia y permitan temperaturas de compactación de la mezcla.

En el año 2000, Shell presentó su sistema WAM Foam durante el Eurobitume realizado en Barcelona; existiendo al mismo tiempo otras soluciones basadas en espuma de asfalto, tecnología que fue desarrollada a mediados de los años '50 en Estados Unidos. Paralelamente comienza la difusión de técnicas basadas en zeolita y en el uso de ceras como depresores de viscosidad.

Últimamente también se ha agregado al portafolio de tecnologías disponibles el uso de aditivos químicos, los cuales actúan como surfactantes, reduciendo la tensión superficial entre los agregados y el ligante y mejorando, por consiguiente, la trabajabilidad de las mezclas manteniendo las prestaciones mecánicas de las mismas (tal como el caso de la tecnología del producto Zycotherm presente en nuestro medio).

La utilización de WARM mixes en Estados Unidos ha tenido un importante desarrollo en los últimos tres años, pasando de 19 millones de toneladas en 2009 a 47 millones en 2010 (13% del total de mezclas en ese país ese año) y esperándose este porcentaje se incremente hasta el 25% para la temporada 2011-2012.

En Europa, si bien no existen especificaciones sobre WARM mixes en la normativa regional vigente desde 2008 (EN 13108-1 a 7), se cree que esto no representará una barrera para el desarrollo de las mismas. Los datos de producción durante 2010 en la región no parecen ser completos: en principio, sólo algunos países informan sobre el particular y la suma alcanza los 5 millones de toneladas, sobre un total de 310 millones de mezclas asfálticas reportadas, lo cual aparece claramente como un valor muy inferior a lo que se estima realmente se ha producido y colocado.

La nanotecnología lleva un desarrollo de años en distintos países de Latinoamérica, como Ecuador, Perú, Colombia, Panamá, Bolivia, Chile, etc.

Uno de los principales productos de consumidos es ZYCOTHERM, que varias empresas han aprovechado las mejoras técnicas y consecuentes beneficios económicos que le ha implicado: aprovechar la reducción de temperaturas de fabricación y compactación de mezcla con nanotecnología, reducción del % óptimo de asfalto, evitar traslado de agregado por bajos valores en estabilidad remanente o falta de adherencia del asfalto y el agregado.

El desarrollo nanotecnológico en Argentina se encuentra en crecimiento. Como parte del programa de difusión, se buscó realizar ensayos de laboratorio de forma que el agregado y el cemento asfáltico sean de locales. Encontrando a la empresa SACDE, que por curiosidad científica ante nuevas tecnologías y rigor técnico desarrollamos de forma conjunta ensayos en su laboratorio central, en la ciudad de Rosario.

Cabe resaltar la definición del término “Nanotecnología” refiere a que el trabajo realizado por este tipo de tecnología esta aplicado en un nivel mil millones de veces menor a la unidad de referencia, ya sea longitud, masa, tiempo, etc.; en este caso dentro de la conformación microscópica de la mezcla asfáltica o del cemento asfaltico más propiamente dicho. Puesto que en caso del cemento asfaltico al cual se le agrega o adhiere este tipo de tecnología se tiene la finalidad de modificar el comportamiento mecánico y reológico del asfalto para mejorar el desempeño de la mezcla asfáltica.

1.3. Justificación

El aporte académico al que se quiere llegar a través de esta investigación pretende aportar de manera importante en el diseño, construcción y mantenimiento de las carreteras de la región, y porque no decirlo del país.

Es importante destacar que los procesos de innovación de verdadero impacto en cualquier disciplina, incluyendo los relacionados con materiales para la construcción de obras de infraestructura vial, generalmente son de larga duración y es común que transcurran años desde su concepción hasta el momento en que sus resultados pueden ser adoptados.

La producción de mezclas asfálticas en tibio es considerada un proceso útil para comenzar con la aplicación de nuevas metodologías de construcción de capas de rodadura para las carreteras de nuestra región, puesto que la producción constante y convencional de mezclas asfálticas calientes ha derivado en el deterioro medioambiental y denota la falta de iniciativa en cuanto a innovación en cuestión de desarrollo de construcción en carreteras ya que el resto del mundo se encuentra comprometido con la causa medio ambiental.

Se considera necesario generar una mezcla asfáltica con aditivación de productos especiales (en este caso puntual Zycotherm) en condiciones controladas de laboratorio para obtener muestras o “briquetas” preparadas con agregados usados normalmente en mezclas asfálticas tradicionales y obtenidas en nuestra región. De esta manera se podrá conocer las propiedades mecánicas básicas de cada componente de la mezcla asfáltica en tibio.

Al realizar el estudio detallado del método propuesto en este trabajo investigativo se puede plantear una opción que pueda suplir a la tradicional mezcla asfáltica caliente; puesto que la implementación de procedimientos novedosos puede ser de gran beneficio económico/practico; así como también para mejorar los aspectos medioambientales con la reducción de los gases que se emiten hacia la atmosfera a partir de las mezclas asfálticas calientes; además de cubrir mayores distancias de acarreo desde la planta procesadora o productora de asfaltos hasta el lugar donde se estén llevando a cabo los trabajos de pavimentación.

Se obtendrán resultados a partir de la experimentación en laboratorios para detallar las características físicas/mecánicas de una mezcla asfáltica en tibio con uso de aditivo, para de esta manera poder comparar dichas características con las características propias de mezclas asfálticas tradicionales en caliente, de donde podremos obtener las diferencias, mejoras, deficiencias y conclusiones inherentes al método presentado en este trabajo investigativo.

1.4.Diseño teórico

1.4.1. Planteamiento del problema

1.4.1.1. Situación problemática

En nuestro medio el uso constante de las mezclas asfálticas calientes convencionales hace que se dé por sentado que este procedimiento se constituya como el método al cual debemos regirnos en la construcción de capas de rodadura con el uso de mezclas asfálticas, dejando de lado la innovación en la búsqueda de nuevos métodos de producción de mezclas asfálticas por parte de las autoridades que tienen como función el diseño y construcción de nuevas vías asfaltadas.

La repetitividad en cuanto concierne a la construcción de carreteras, la creciente inquietud de creación de conciencia medio ambiental y la búsqueda de mejoras en las especificaciones técnicas en la producción de mezclas asfálticas; han llevado a que en numerosos lugares del mundo se innove en el diseño de mezclas asfálticas, generando nuevas tecnologías y métodos de producción de mezclas asfálticas.

Ante el retraso de algunas regiones de nuestro país en cuanto a la comunicación vial entre comunidades habitadas, es menester de los estudiantes y practicantes de la ingeniería la búsqueda de nuevas opciones de diseño y construcción de vías pavimentadas.

Los procesos de mezcla y compactación empleados en la producción de las mezclas asfálticas en caliente requieren uso elevado de combustible y altas temperaturas, por lo que la emisión de gases contaminantes es de gran consideración, haciendo costoso el proceso y causando un grave daño ambiental.

Adicionalmente a todo lo mencionado anteriormente se producen daños al ecosistema alrededor de las zonas de pavimentación al escurrir el bitumen hacia los afluentes de agua afectando flora y fauna propia de la región.

Los gases producidos por las mezclas asfálticas calientes, también causan deterioro en la salud de los trabajadores que la manipulan, debido a que inhalan los mismos causando daño en sus pulmones; así como también existe la posibilidad de sufrir quemaduras de magnitud debido por las altas temperaturas que genera la mezcla.

Las mezclas suelen enfriarse en forma inesperada, debido a la caída de temperatura ambiente, incremento en los vientos o a lluvias repentinas. Esto produce inconsistencias en las densidades durante las operaciones de pavimentación.

1.4.1.2. Problema

¿De qué manera la fabricación de mezclas asfálticas tibias con uso de aditivo, puede disminuir los aspectos negativos encontrados dentro de la producción de mezclas asfálticas calientes, para ayudar a reducir la temperatura en los procesos de producción, colocación y compactación; sin perder calidad y en busca de mejorar las especificaciones técnicas de dichas mezclas y aspectos?

1.4.2. Objetivos

1.4.2.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas en tibio con el uso del aditivo “Zycotherm” para la construcción de capas de rodadura en carreteras, mediante ensayos de laboratorio físico-mecánicos para realizar una comparación de valores e indicadores de este método de producción en relación con las mezclas asfálticas calientes convencionales e identificar los beneficios y/o mejoras mediante enfoque comparativo de dichas propiedades.

1.4.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los componentes de la mezcla asfáltica (asfalto y agregados) mediante ensayos de laboratorio.
- Producir muestras de laboratorio (briquetas) de mezclas asfálticas convencionales con el aditivo Zycotherm a temperaturas tibias de 100°C, 110°C, 120°C, 130°C y 140°C, aplicando el Método Marshall y determinar sus propiedades.
- Producir muestras de laboratorio (briquetas) con el Método Marshall y determinar sus propiedades, de mezclas asfálticas convencionales y mezclas con aditivo Zycotherm a temperaturas menores y mayores al rango de mezclas tibias para conocer el

comportamiento del Zycotherm a otras temperaturas como 80°C, 90°C, y 150°C, 160°C respectivamente.

- Analizar las propiedades físico mecánicas de las mezclas asfálticas en tibio a diferentes temperaturas vs. mezclas asfálticas convencional, mediante tablas y graficas comparativas.
- Elaborar un análisis económico de uso de aditivo Zycotherm, tomando en cuenta la incidencia entre costo/beneficio.
- Plantear el método para disminuir los efectos ambientales negativos de manera que esta investigación se convierta en un documento que aporte al crecimiento del sector vial de nuestra región. Justificando la importancia de tener presente una alternativa para reducir el uso de las mezclas asfálticas calientes y sus nocivos efectos ambientales.

1.4.3. Hipótesis

Si se elaboran varios especímenes con mezclas asfálticas, con y sin aditivo a temperaturas comprendidas dentro del rango de “mezclas tibias” entonces se podrá apreciar una diferencia entre sus resistencias técnicas, con la finalidad de obtener resultados que cumplan las especificaciones y permitan ser comparados y analizados, de tal manera que se pueda determinar el tipo de mezcla asfáltica óptima para la aplicación en carreteras de nuestro entorno.

1.4.4. Definición de variables independientes y dependientes

1.4.4.1. Variable independiente

X1 = Contenido de aditivo Zycotherm

1.4.4.2. Variable dependiente

Y1 = Temperaturas de mezclas tibias

1.5.Diseño metodológico

1.5.1. Conceptualización y operacionalización de variables

Tabla 1.1. Conceptualización y operacionalización de variables

Variable	Conceptual	Operacionalización				
		Dimensión	Indicador	Valor acción/técnicas		
Variable Independiente	Se refiere a la aditivacion del producto multipropósito Zycotherm dentro de una mezcla asfáltica.	Aditivo Zycotherm	Caracterización del aditivo	Aditivacion en el betún		
Aditivacion Zycotherm				Material granular	Caracterización del material granular	Aditivacion en los agregados
		Cemento asfaltico	Caracterización del asfalto			Granulometría
						Peso especifico
				Absorción		
				Punto de inflamación		
		Mezcla asfáltica	Caracterización de las mezclas asfálticas	Aplicación método Marshall	Ductibilidad	
					Penetración	
		Variable Dependiente	Se refiere a la temperatura a la cual se obtiene una mezcla asfáltica tibia con el uso del aditivo multipropósito Zycotherm	Mezcla asfáltica	Caracterización de las mezclas asfálticas	Aplicación método Marshall
Temperatura de la mezcla asfáltica en la etapa de producción						

Fuente: Elaboración propia

1.5.2. Componentes

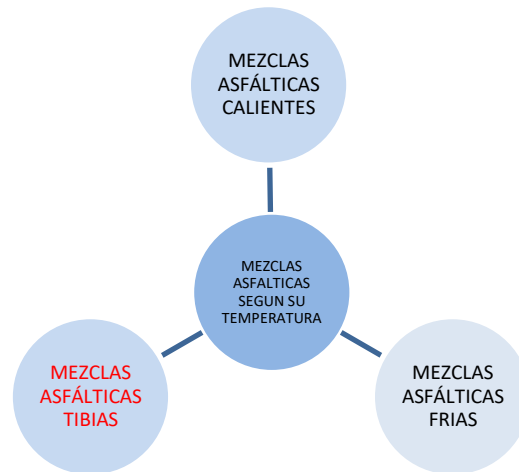
1.5.2.1. Unidades de estudio y decisión muestral

1.5.2.1.1. Unidad de Estudio

- Mezclas asfálticas

1.5.2.1.2. Población

Tipos de mezclas asfálticas:



1.5.2.1.3. Muestra

Mezclas asfálticas tibias

1.5.2.2. Muestreo

1.5.2.2.1. Análisis Estadístico

Selección de las técnicas de muestreo: Técnica de muestreo estratificada.

Nivel de confianza

Nivel de Confianza (%)	Valor del Nivel de Confianza "Z" (adimensional)
50	0,574
80	1,280
85	1,444
90	1,640
95	1,960
99	2,680

Tamaño de la muestra: Primera Población:

$$z = 2,12$$

$$p = 0,5$$

$$q = 0,5$$

$$e = 0,04$$

Nivel de Confianza = 96%

Tabla 1.2. Tabla para el cálculo de la muestra

Ensayos	Cantidad	pi	qi	pi*qi	Ni*pi*qi	wi	ni
Caracterización de los Agregados							
Desgaste de los Ángeles	12	0,5	0,5	0,25	3	0,0147	6
Equivalente de arena	6	0,5	0,5	0,25	1,5	0,0073	3
Granulometría	8	0,5	0,5	0,25	1,5	0,0073	3
Peso específico	18	0,5	0,5	0,25	4,5	0,0220	8
Cemento Asfáltico							
Peso específico	10	0,5	0,5	0,25	2,5	0,0122	5
Punto de ablandamiento	6	0,5	0,5	0,25	1,5	0,0073	3
Penetración	10	0,5	0,5	0,25	2,5	0,0122	5
Viscosidad	610	0,5	0,5	0,25	2,5	0,0122	5
Punto de inflamación	46	0,5	0,5	0,25	1,5	0,0073	3
Destilación	104	0,5	0,5	0,25	1	0,0049	2
Ductilidad	10	0,5	0,5	0,25	2,5	0,0122	5
Propiedades mecánicas resistentes							
Estabilidad	144	0,5	0,5	0,25	36	0,1760	67
Fluencia	144	0,5	0,5	0,25	36	0,1760	67
% de vacíos de aire	144	0,5	0,5	0,25	36	0,1760	67
% de vacíos de agregado mineral	144	0,5	0,5	0,25	36	0,1760	67
Peso unitario	144	0,5	0,5	0,25	36	0,1760	67
Sumatoria:	818				204,5	1	378

Fuente: Elaboración propia

Población:

$$N = \frac{z^2 * p * q}{e^2}$$

$$N = \frac{2,12^2 * 0,5 * 0,5}{0,04^2}$$

$$N = 378 \text{ ensayos}$$

Muestra:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n Ni * pi * qi}{N * \frac{e^2}{z^2} + \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^n Ni * pi * qi}$$

$$n = \frac{204,5}{378 * \frac{0,04^2}{2,12^2} + \frac{1}{378} * 204,5}$$

$$n = 108 \text{ ensayos}$$

En la aplicación práctica, se logra realizar la siguiente cantidad de ensayos:

Tabla 1.3. Tabla de N° de ensayos realizados a los agregados pétreos

Ensayo	Agregado	N° de ensayos
Granulometría	Grava	3
	Gravilla	3
	Arena	3
Peso específico	Grava	3
	Gravilla	3
	Arena	3
Peso unitario	Grava	3
	Gravilla	3
	Arena	3
Desgaste de los ángeles	Grava	1
	Gravilla	1
Caras fracturadas	Grava	1
	Gravilla	1
Partículas largas y achatadas	Grava	1
	Gravilla	1
Equivalente de arena	Arena	3
Total		36

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.4. Tabla de N° de ensayos realizados al cemento asfáltico 85/100

Ensayo	Condición	N° de ensayos
Penetración	Puro	3
	Con Zycotherm	3
Ductilidad	Puro	3
	Con Zycotherm	3
Punto de inflamación	Puro	3
	Con Zycotherm	3
Punto de ablandamiento	Puro	3
	Con Zycotherm	3
Peso específico	Puro	3
	Con Zycotherm	3
Viscosidad	Puro	3
	Con Zycotherm	3
Total		36

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.5. Tabla de N° de briquetas realizadas con mezclas asfálticas

Ensayo Marshall	Temperatura de mezclado	Cantidad de briquetas por cada porcentaje de Cemento Asfáltico						Cantidad total de briquetas
		4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%	
1	80°C	3	3	3	3	3	3	18
2	90°C	3	3	3	3	3	3	18
3	100°C	3	3	3	3	3	3	18
4	110°C	3	3	3	3	3	3	18
5	120°C	3	3	3	3	3	3	18
6	130°C	3	3	3	3	3	3	18
7	140°C	3	3	3	3	3	3	18
8	150°C	3	3	3	3	3	3	18
9	160°C	3	3	3	3	3	3	18
Sub Total								162

Ensayo Marshall	Temperatura de mezclado	Cantidad de briquetas por cada porcentaje de Zycotherm						Cantidad total de briquetas
		0,05%	0,06%	0,07%	0,08%	0,09%	0,10%	
10	80°C	3	3	3	3	3	3	18
11	90°C	3	3	3	3	3	3	18
12	100°C	3	3	3	3	3	3	18
13	110°C	3	3	3	3	3	3	18
14	120°C	3	3	3	3	3	3	18
15	130°C	3	3	3	3	3	3	18
16	140°C	3	3	3	3	3	3	18
17	150°C	3	3	3	3	3	3	18
18	160°C	3	3	3	3	3	3	18
19	Con óptimos 110°C, 5,75% de asfalto y 0,083% Zycotherm							30
Sub Total								192

Total								354
--------------	--	--	--	--	--	--	--	------------

Fuente: Elaboración propia

1.5.3. Métodos y técnicas empleadas

1.5.3.1. Selección de métodos y técnicas

Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas

Este método de diseño está basado en la investigación desarrollada en la universidad de Illinois usando un Método Marshall modificado de diseño de mezcla y un ensayo de durabilidad húmeda.

El método y los criterios de ensayos recomendados, son aplicables para mezclas de agregados para base granular de bajos volúmenes de tráfico, conteniendo cemento asfáltico o emulsión asfáltica y agregados minerales de gradación densa con tamaño máximo de 1" (25 mm) o menos. Este método de diseño es recomendado para mezclas en camino o elaboradas en planta, preparadas a temperatura ambiente.

El método se describe con el siguiente procedimiento de diseño envuelve los siguientes pasos principales:

Ensayos de calidad en agregados.

Ensayos de calidad en cementos asfálticos.

Tipo y cantidad aproximada del material bituminoso.

Variación del contenido de ligante bituminoso.

Selección del contenido óptimo del ligante bituminoso.

1.5.3.2. Técnicas de muestreo

1.5.3.2.1. Técnica de muestreo no probabilística

El muestreo no probabilístico se aplica para la obtención de los materiales pétreos, el cemento asfáltico, además del aditivo Zycotherm, ya que estos materiales son seleccionados intencionalmente.

Los agregados se obtuvieron de la comunidad de Charaja (Rio Camacho), procesadora de áridos a cargo de SEDECA.

El cemento asfáltico Betunel 85/100 tiene procedencia del país de Brasil y fue proporcionado también por el gobierno municipal de la provincia Cercado del departamento de Tarija.

El aditivo Zycotherm, fue proporcionado por la empresa cruceña BREM CIA. LTDA., que es parte de la franquicia ZYDEX.

1.5.3.3. Descripción de equipos e instrumentos

A. Para la caracterización de los agregados

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

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

Juego de tamices. - El juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11, lo cual contiene los tamices 3", 2 ½", 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", N° 4, N° 10, N° 40, N° 200, tapa y base.

B. Para la caracterización del ligante asfáltico

Penetrómetro de asfalto. - Que sirve para determinar la penetración del cemento asfáltico en estudio.

Picnómetros de vidrio. - Con los cuales se determina la densidad específica del cemento asfáltico en estudio.

Aparato para la determinación del punto de inflamación Cleveland de copa abierta. - Con el cual se determina el punto de Ignición o punto de llama del cemento asfáltico en estudio.

Aparato para determinar el punto de ablandamiento. - Con este equipo se determina el punto en que se reblandece el asfalto a temperaturas reales de la puesta en obra.

Ductilímetro. - Aparato que permite determinar la ductilidad o estado de alargamiento de los cementos asfálticos.

C. Para la dosificación y diseño de briquetas

Moldes Marshall. - En estos moldes se vaciará la mezcla bituminosa ya sea en frío o en caliente, creando briquetas con distintos porcentajes de emulsión asfáltica.

Martillo Marshall. - Este martillo sirve para compactar las briquetas según especificaciones técnicas.

D. Para los ensayos de resistencia mecánica

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

Cabezal de rotura Marshall. - Este cabezal junto con el marco multiplex, permite realizar lecturas de estabilidad y fluencia para las briquetas en análisis.

1.5.3.4. Procedimiento de aplicación

Caracterización de los agregados

Para caracterizar los agregados pétreos, se debe realizar el respectivo secado en el horno y luego someterlo a la serie de tamices, con trillado constante en el RopTap por unos

quince minutos aproximadamente, luego de este tiempo proceder al pesaje del material que contiene cada tamiz. Con estos valores obtener la curva granulométrica, según especificaciones del método Marshall.

También se deben realizar los ensayos de peso específico, equivalente de arena y el desgaste de los ángeles, debiendo cumplir las especificaciones para mezclas asfálticas.

Caracterización del ligante asfáltico

en este proyecto la caracterización del cemento asfáltico, se basa en la determinación de la penetración, ductilidad, punto de ablandamiento, punto de inflamación y densidad específica. Estos parámetros deben cumplir con los rangos especificados por normas, caso contrario no sería viable para realizar mezclas asfálticas y se buscaría otra procedencia del ligante asfáltico.

La caracterización del aditivo está contemplada dentro de las referencias otorgadas por los fabricantes.

Dosificación y diseño de briquetas

El diseño de las briquetas se seguirá el método Marshall.

Para la dosificación de las briquetas, se debe considerar que la granulometría del agregado será constante, como se determinó anteriormente. A este agregado se le incluirá el ligante asfáltico analizando seis porcentajes (4,5%; 5,0%; 5,5%; 6,0%; 6,5%; 7%), tanto para el cemento asfáltico para mezclas en caliente, como para mezclas asfálticas Zycotherm; cabe resaltar que, para las mezclas tibias, los porcentajes de uso de aditivo son variados a diferentes temperaturas.

Por lo tanto, se analizarán seis porcentajes de ligante asfáltico, cada porcentaje con tres briquetas analizadas, haciendo un total de 18 briquetas en estudio según especificaciones Marshall.

Ensayos de resistencia técnica

Para los ensayos de resistencia técnica, se deben tener listas las briquetas, con su respectiva enumeración, para luego someterlas a las pruebas que determinen la densidad, vacíos de la mezcla, vacíos del agregado mineral, relación ligante bituminoso-vacío, estabilidad y fluencia según el método Marshall.

1.5.3.5. Preparación previa

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

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

1.5.4. Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información

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

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

Con los ensayos de pruebas de propiedades técnicas determinamos las siguientes curvas tanto para las mezclas en tibias como para las mezclas en caliente:

Para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico se analizarán las siguientes gráficas usando el método estándar convencional de mezclado en caliente:

- a.1. % de Cemento Asfáltico vs. Estabilidad
- a.2. % de Cemento Asfáltico vs. Fluencia
- a.3. % de Cemento Asfáltico vs. Densidad
- a.4. % de Cemento Asfáltico vs. % de Vacíos de la Mezcla
- a.5. % de Cemento Asfáltico vs. % de Vacíos del Agregado
- a.6. % de Cemento Asfáltico vs. Relación Betún–Vacíos

Posteriormente con el contenido óptimo de cemento asfáltico, se determinará el contenido óptimo del aditivo ZYCOTHERM, aplicando el método de mezclado en tibio a diferentes temperaturas: 80°C, 90°C, 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C y 160°C. para los cuales se analizarán las siguientes gráficas:

- b.1. % de Zycotherm vs. Estabilidad
- b.2. % de Zycotherm vs. Fluencia
- b.3. % de Zycotherm vs. Densidad

- b.4. % de Zycotherm vs. % de Vacíos de la Mezcla
- b.5. % de Zycotherm vs. % de Vacíos del Agregado
- b.6. % de Zycotherm vs. Relación Betún–Vacíos

1.6. Alcance de la investigación

El presente trabajo investigativo pretende dotar de información confiable y novedosa en cuanto a la aplicación del aditivo Zycotherm dentro de la producción de mezclas asfálticas tibias, con el fin de evitar la contaminación ambiental y en busca de mejorar las propiedades físico mecánicas de dichas mezclas a ser aplicadas en la construcción de carreteras a nivel regional y nacional. Todo esto enmarcado en el cumplimiento de normas vigentes reguladas por instituciones encargadas del ramo (ABC, SEDECA, etc.) y dictadas mediante normas ABC. Aplicables de manera obligatoria para cualquier trabajo de estas características.

Se realizaron mezclas asfálticas con cemento asfáltico Betunel 85/100 y agregados pétreos proporcionado por la chancadora de Charaja de SEDECA, a diferentes temperaturas: 80°C, 90°C, 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C y 160°C, si bien las mezclas tibias están en el rango de 100°C – 140°C, el presente trabajo también tiene la finalidad de observar que ocurre con el aditivo a menor y mayor temperatura de producción. A estas temperaturas se estudiaron dos tipos de mezclas, la primera, una mezcla convencional y la segunda, una mezcla con aditivo Zycotherm, para analizar las ventajas y desventajas que tiene su uso, con sus respectivos controles de calidad.

En el capítulo I, se determinan los objetivos, hipótesis y las variables de la investigación, según la necesidad de conocer el comportamiento que tiene el aditivo Zycotherm en mezclas asfálticas tibias.

En el capítulo II, se muestra todo el respaldo teórico de mezclas tibias comparándolas con las mezclas convencionales en frío y caliente, y a su vez la aplicación, ventajas y desventajas que tiene el producto aditivo Zycotherm que fue fabricado para realizar mezclas tibias.

En el capítulo III, se desarrolla toda la parte práctica de investigación realizada en laboratorio, comenzando con la caracterización de los agregados de la chancadora Charaja, luego con la caracterización del cemento asfáltico 85/100 Betunel, después con

la dosificación de mezclas asfálticas según normas del Método Marshall, posteriormente la realización rotura de briquetas, para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico y el contenido óptimo del aditivo Zycotherm a diferentes temperaturas de mezclado.

En el capítulo IV, se realiza un análisis de resultados para determinar qué porcentaje de aditivo es el más conveniente, y si cumple o no con las expectativas de venta del producto, además de las ventajas y desventajas para su aplicación.

En el capítulo V, se plasman conclusiones acordes a los resultados observados y comparándolos con los resultados esperados que propone la empresa proveedora.

CAPITULO II

DEFINICIONES, CRITERIOS IMPORTANTES DE CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1. Antecedentes generales

En la India, el 95% de las carreteras son carreteras bituminosas que consisten aproximadamente en el 93-95% de agregado y 5-7% de material aglutinante. Hasta ahora, los aglutinantes bituminosos convencionales eran resultados satisfactorios, pero con el aumento de la intensidad del tráfico, existe la necesidad de mejorar material aglutinante que puede funcionar mejor bajo cargas de tráfico pesado sin comprometer el rendimiento de mezcla bituminosa. La modificación del polímero en betún ofrece una mejor solución para superar las deficiencias en las propiedades del aglutinante convencional. Varias investigaciones han demostrado que la modificación del polímero en el betún mejora el rendimiento de las mezclas bituminosas bajo amplio rango de variación de temperatura. Algunos polímeros como el polímero SBS tienen tendencia para aumentar la viscosidad del betún. Un aglutinante más viscoso requiere alta temperatura para mezcla y compactación de mezcla bituminosa. También se agregan varios aditivos en betún para que para disminuir la temperatura de mezcla y compactación de las mezclas disminuyendo la viscosidad de aglutinante a temperatura elevada. La reducción en la temperatura de mezcla y pavimentación disminuya la energía requerida para hacer mezclas bituminosas. El aditivo Zycotherm es un aditivo inodoro de nano organosilano utilizado para mezclas bituminosas. Zycotherm proporciona una mejor unión química para una mayor resistencia a la humedad y asegura 100% de recubrimiento de betún a baja temperatura. En este estudio se agrega aditivo Zycotherm a betún limpio y varias comparaciones se realizaron mediante prueba convencional y prueba reológica en betún. Se evalúa el efecto de Zycotherm sobre las propiedades mecánicas del aglutinante bituminoso, por los resultados comparativos de la prueba de estabilidad Marshall y la prueba de resistencia a la tracción indirecta.

2.2. Definiciones y criterios

2.2.1. Definiciones

Pavimento. - Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para el adecuado funcionamiento son: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aun en condiciones húmedas puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en la terracerías, además que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza y por consecuencia son los más económicos.

La división en capas obedece a un factor económico, ya que cuando determinamos el espesor de una capa el objetivo es darle el grosor mínimo q reduzca los esfuerzos en la capa inmediata inferior. La resistencia de las diferentes capas no solo dependerá del material, también resulta de gran influencia el procedimiento constructivo, siendo dos factores importantes la compactación y la humedad.

Áridos: Se denomina árido al material granulado que se utiliza como materia prima en la construcción, principalmente. El árido se diferencia de otros materiales por su estabilidad química y su resistencia mecánica, y se caracteriza por su tamaño. No se consideran como áridos aquellas sustancias minerales utilizadas como materias primas en procesos industriales debido a su composición química.

Mezcla asfáltica: También conocido como hormigón asfáltico, hormigón bituminoso, concreto bituminoso o agregado asfáltico, consiste en un agregado de asfalto y materiales minerales (Mezcla de varios tamaños y finos), que se mezclan juntos se extienden en capas y se compactan.

Debido a sus propiedades es el material más común en los proyectos de construcción de carreteras, aeropuertos y aparcamientos.

Mezclas asfálticas tibias: Se refiere a un grupo de tecnologías que permiten la reducción de temperatura de producción y colocación de la mezcla.

Viscosidad: Es la resistencia la cortante que tiene un fluido a ciertas temperaturas. Es una propiedad física característica de todos los fluidos, el cual emerge de las colisiones entre las partículas del fluido que se mueven a diferentes velocidades, provocando una resistencia a su movimiento.

Método Marshall: Ensayo para determinar los valores de estabilidad, deformabilidad y porcentaje óptimo de los pavimentos asfálticos ideado por Bruce G. Marshall.

Modificador Reológico: Como su término indica, consiste en modificar la viscosidad del cemento asfáltico mediante aditivos.

Terreno de fundación. - Suelo que sirve de fundación al pavimento después de haber terminado el movimiento de tierras y q una vez compactado tiene las secciones transversales y pendientes de diseño.

Superficie subrasante. - Es la que corresponde al terreno de fundación.

Subbase. - Capa de material seleccionado que se coloca encima de la sub rasante.

Base.- Capa de material pétreo, mezcla de suelo cemento, mezcla bituminosa o piedra triturada q se coloca encima de la subbase.

Capa de rodamiento. - La que se coloca encima de la base y está formada por una mezcla bituminosa o de concreto.

No siempre un pavimento se compone de todas las capas anteriores. La ausencia de una o varias de ellas depende de la calidad del terreno de fundación, la clase del material a usarse y el tipo de pavimento, la carga de diseño, etc.

Carpeta de desgaste o sello. - La que se coloca encima de la capa de rodadura y está formada por una mezcla bituminosa.

Cemento asfáltico: Es un material de color oscuro, cuya propiedad principal es ser ligante. Su consistencia está en función de la temperatura, siendo líquida a temperaturas altas mayores de 60°C, rígido a temperatura bajas menores de 5°C. Su uso principal es para la construcción de mezclas asfálticas.

Son asfaltos refinados o una combinación de asfalto refinado y aceite fluidificante de consistencia apropiada para trabajos de pavimentación. Estos asfaltos refinados son muy duros y se les da la consistencia, mezclándolos con aceites o residuos provenientes de la destilación del petróleo de base asfáltica. Los cementos asfálticos se dividen en grados según su dureza o consistencia, que es medida mediante el ensayo de penetración medido en 1/10 mm, valor que es inverso a la dureza. De acuerdo a esto, los cementos asfálticos comúnmente usados son: CA 60 – 70 y CA 80 – 100, las dos cifras indican los límites máximos y mínimos de la penetración.

Cohesión: es la capacidad del cemento asfáltico de mantener firmemente las partículas de agregado en el pavimento terminado.

Mezcla Asfáltica Tibia (MAT): las mezclas asfálticas tibias son elaboradas, colocadas y compactadas a temperaturas inferiores a las convencionales, exigiéndose que sus características y su comportamiento en servicio sean iguales o superiores a los de las mezclas convencionales.

Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC): se define como mezcla densa en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos (incluido el polvo mineral) con granulometría continua y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido

2.2.2. Criterios

Terreno de fundación. - La capacidad de soporte depende en gran parte del espesor q debe tener un pavimento.

- a) Si el terreno de fundación es pésimo debe desecharse y sustituirse por otro de mejor calidad.
- b) Si el terreno de fundación es malo habrá de colocarse una sub base de material seleccionado antes de poner la base.
- c) Si el terreno de fundación es bueno puede prescindirse de la subbase
- d) Si el terreno de fundación es excelente puede prescindirse de la subbase y la base.

Compactación del terreno de fundación.

1. Si los suelos son arcillosos, deberá exigirse en el campo un mínimo de 95% de la densidad de laboratorio, determinada según el método AASTHO T-180-D.

El espesor mínimo del terreno de compactación debidamente compacto, estará relacionado con el tipo de tránsito:

- a) Índice de tráfico <10 "tráfico reducido"; el terreno habrá de compactarse de 6" a 12" de espesor mínimo.
- b) Índice de tráfico 10 – 100 "tráfico mediano"; el terreno habrá de compactarse 6" a 18" de espesor mínimo.
- c) Índice de tráfico >100 "tráfico intenso"; el terreno habrá de compactarse 18" a 24" de espesor mínimo.

2. Si el terreno de fundación está formado por suelos no cohesivos, deberá exigirse una compactación no menor de 100% de la densidad obtenida en laboratorio según el método AASTHO T-180-D. Además, el espesor del terreno de fundación compactado tiene que ser:

- a) No menor de 6" a 12 " Tráfico reducido
- b) No menor de 12" a 18 " Tráfico regular.
- c) No menor de 18" a 24 "

Capa subbase. Es la capa de material seleccionado que se coloca encima de la subrasante

Tiene por objeto:

- a) Servir de capa de drenaje al pavimento.
- b) Controlar o eliminar los cambios de volumen, elasticidad y plasticidad perjudiciales que pudiera tener el material de la subrasante.
- c) Controlar la ascensión capilar del agua proveniente de las capas freáticas para proteger de los hinchamientos.

El material debe ser seleccionado y debe tener mayor capacidad que el terreno de fundación compactado, este material puede ser grava, arena, grava o granzón, escoria de los altos hornos y residuos de material de cantera.

El material debe tener las características de un suelo A1 o A2, con límite líquido inferior a 35% e índice plástico no mayor a 6, el CBR no podrá bajar del 15%.

Normalmente la subbase se construye para lograr espesores menores en la capa base, en el caso de pavimentos flexibles.

Compactación de la subbase. Para todos los tipos de tráfico ha de compactarse hasta alcanzar un mínimo de 97% de la densidad del laboratorio obtenida por diferentes métodos.

Capa base. Tiene por finalidad absorber los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos y además repartir uniformemente los esfuerzos a la subbase y terreno de fundación. Puede ser de material granular o estar formadas por bituminosas o mezclas estabilizadas con cemento u otro material ligante.

El material pétreo que se emplee debe cumplir con los siguientes requisitos.

- a) Resistente a los cambios de temperatura y humedad.
- b) No presentar cambios al volumen q sean perjudiciales.
- c) El % d desgaste d los ángeles debe ser menor a 50.
- d) La fracción de material q pasa el N° 40 ha de tener un límite líquido menor al 25% y un índice de plasticidad menor a 6.
- e) La fracción q pase el N° 200 no podrá exceder la ½. En ningún caso de los 2/3 de la fracción q pase el N°40.
- f) La graduación del material de la base es necesario q se halle dentro de los límites indicados.
- g) El CBR no debe ser inferior a 50%.

La capa base constituye una capa intermedia entre la capa de rodamiento y la subbase. Generalmente se la usa en pavimentos flexibles. Esta capa permite reducir los espesores de la carpeta, además cumple una función drenante del agua atrapada dentro del pavimento.

Compactación de la base. Compactarse hasta alcanzar un mínimo de 97% de la densidad del laboratorio obtenida por diferentes métodos.

Capa de rodadura. - Su función primordial será proteger la base impermeabilizando la superficie para poder evitar así las infiltraciones de agua de lluvia que podrían saturar las capas inferiores, además evita que se desgaste o desintegre la base a causa del tránsito de los vehículos.

Asimismo, la capa de rodamiento contribuye en cierto modo a aumentar la capacidad de soporte del pavimento, especialmente si su espesor es mayor a 3".

Debe resistir las presiones verticales de contacto de las ruedas que pueden llegar a los 15 Bares, las tensiones tangenciales de frenado, las succiones debidas al comportamiento de los neumáticos, etc.

La resistencia al deslizamiento de los neumáticos se comprende de dos sumandos:

- a) Rozamiento por adherencia. Debido a las interacciones moleculares que se producen en el área real de contacto entre los neumáticos y el pavimento.
- b) Rozamiento por histéresis. Producido por las pérdidas de energía elástica por efecto de las irregularidades de la superficie que obliga al caucho a deformarse.

Son dos variables fundamentales para el deslizamiento, la velocidad del vehículo y la textura de la superficie de la carretera.

Texturas superficiales: lisa, áspera, rugosa lisa, rugosa áspera.

Pueden ser materiales granulares con o sin liga, o más comúnmente de concreto asfáltico o hidráulico. Constituye el área propiamente dicha donde circulan los vehículos y los peatones.

Compactación de la capa de rodamiento. Compactarse hasta alcanzar un mínimo de 97% de la densidad del laboratorio obtenida por diferentes métodos.

2.2.3. Propiedades de las mezclas asfálticas para capas de rodadura

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, en particular en el centro de Europa, 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.

En las capas de rodadura el uso de agregados de alta calidad y de aditivos se justifica por las solicitudes a que están sometidas. Actualmente la modificación de ligantes se ha generalizado para carreteras importantes persiguiéndose la optimización de la respuesta mecánica y de la durabilidad de la mezcla. Por la misma razón, la calidad de los agregados es absolutamente imprescindible, aunque todo ello suponga un costo mayor para el pavimento.

Un pavimento flexible es una carpeta asfáltica, la cual proporciona la superficie de rodamiento.

Las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores redistribuyen por medio de las características de fricción y de cohesión de las partículas de los materiales y la carpeta asfáltica se pliega a pequeñas deformaciones de las capas inferiores sin que su estructura se rompa. Las capas que forman un pavimento flexible son:

Carpeta asfáltica.

Base.

Sub-Base.

Finalmente, y debido al corto plazo en servicio de las actuaciones realizadas en general, mayores datos que aseguren y confirmen la durabilidad de las mezclas con esta tecnología darán soporte a la incorporación de las mismas en futuros pliegos y especificaciones.

2.3. Definición de mezcla asfáltica y componentes

Definición de mezcla asfáltica. - Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. (Kraemer et al., 2004).

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 tráfico pesados intensos.

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

Cemento asfáltico. - El cemento asfáltico o asfalto es un material que puede ser encontrado en la naturaleza en yacimientos naturales o a través de la destilación del crudo de petróleo. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de la mezcla en caliente que se va a producir en esta investigación.

El asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes.

En su constitución química el asfalto básicamente está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono) y algunas trazas de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. El asfalto, cuando es diluido en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfaltenos y maltenos.

Los asfaltenos no se disuelven en el heptano. Los asfaltenos una vez separados de los maltenos, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parece al polvo grueso de grafito. Los asfaltenos le dan al asfalto su color y dureza.

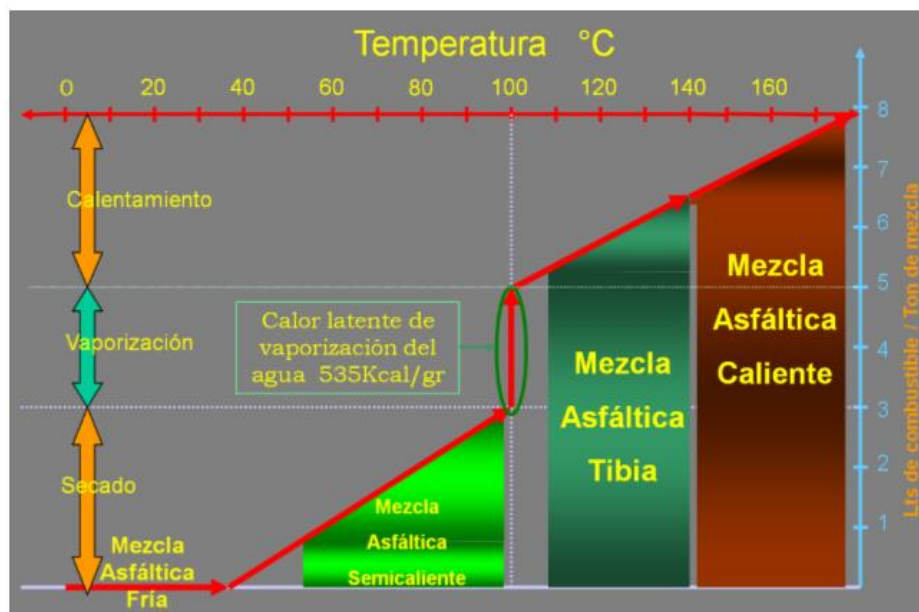
Los maltenos se disuelven en el heptano. Son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. Las resinas son, por lo general, líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, mientras que los aceites son de color más claro. Las resinas proporcionan las cualidades adhesivas en el asfalto, mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfaltenos y las resinas. La proporción de los asfaltenos y maltenos en los asfaltos puede variar debido a un sin número de factores, incluyendo altas temperaturas, exposición a la luz y el oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla del pavimento y espesor de la película de asfalto en las partículas de agregado.

2.3.1. Clasificación de las mezclas asfálticas por la temperatura de producción y puesta en obra

Según la temperatura de fabricación y puesta en obra podemos establecer otros tres tipos de mezclas bituminosas. Son las siguientes:

- Mezclas frías.
- Mezclas semitibias.
- Mezclas tibias.
- Mezclas calientes.

Figura 2.1. Rangos de temperatura de producción de mezclas asfálticas.



Fuente: Comisión permanente del asfalto. Noviembre de 2008

Tabla 2.1. Clasificación de las mezclas asfálticas por temperatura.

Tipo de mezcla	Rango de temperatura	Objetivo	Resultado
Mezclas en frío	25°C a 60°C	Permitir la incorporación en la mezcla de una alta proporción de material reciclado.	Las mezclas en frío con emulsiones asfálticas donde los agregados se revisten a temperaturas bajas en una emulsión de asfalto en agua, pueden utilizarse como capas intermedias, capas de refuerzo e incluso, capas de rodadura.
Mezclas semitibias	60°C a 100°C	Maximizar los ahorros energéticos y las emisiones aprovechando parte de la humedad presente en los agregados.	Se están desarrollando varios productos y procesos para producir mezclas semi-templadas, a partir de emulsiones en planta, que resulten convencionales a los procesos de mezcla en caliente. Aunque los procesos más ambiciosos de reducción de temperatura hacen uso de las propiedades de espumado del asfalto, cuando entra en contacto con el aire y la humedad bajo presión; así, a medida que se expande el volumen del asfalto, su viscosidad disminuye y se hace posible el revestimiento completo de los agregados. (Hassan, 2009).
Mezclas tibias	100°C a 140°C	Reducir los requerimientos térmicos de las mezclas en caliente.	Se mantienen o mejoran las características de rendimiento final de la mezcla asfáltica, para ello se requiere una tecnología para reducir la viscosidad del ligante durante las fases de mezcla y tendido, sin tener un efecto negativo a las temperaturas de uso. (Transportation Research Board of the National Academies, 2009).
Mezclas en caliente	140°C a 180°C	Producción de mezcla asfáltica convencionalmente.	Son mezclas producidas por técnicas convencionales donde la temperatura de producción es elevada. Estas mezclas son de alto desempeño.

Fuente: Comisión permanente del asfalto. Noviembre de 2008

2.3.1.1. Mezcla asfáltica en frío

Las mezclas en frío son mezclas de agregados pétreos no calentados o poco calentados, emulsión asfáltica y agua para mezclado. Por lo general se trabaja a temperatura ambiente estándar o dentro del rango de 25°C a 60°C.

La variedad de tipos y grados de emulsión disponibles, es una clara ventaja cuando se usan agregados de canteras o agregados de calidad marginal, o de río.

2.3.1.2. Mezcla asfáltica semitibia o semitemplada

Las mezclas asfálticas semitibias o semitempladas, son aquellas mezclas que a pesar de tener como principal componente las emulsiones asfálticas, son calentadas levemente para generar mejor adherencia del ligante asfáltico residual al agregado. Este tipo de mezclas asfálticas entran en el rango de temperatura de producción de 60°C hasta 100°C.

2.3.1.3. Mezcla asfáltica tibia o templada

El término mezcla asfáltica en tibia se refiere a un grupo de tecnologías que permiten la reducción de la temperatura de producción y colocación de la mezcla. La mezcla asfáltica tibia puede producirse en el rango de 100°C a 140°C gracias al uso de tecnologías que reducen la viscosidad de la mezcla y mejoran su trabajabilidad., su producción involucra nuevas tecnologías a partir de los cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales.

El concepto de mezcla tibia surgió en Europa, tras la necesidad de una mezcla bituminosa que ofreciera economía de energía y tuviera el mismo desempeño de las mezclas bituminosas en caliente.

El desarrollo de esta tecnología con enfoque en la reducción de temperatura de mezcla y compactación empezó en 1997, para cumplir con el Protocolo de Kyoto. La alternativa también facilita el trabajo de pavimentación en los países en los que el invierno es muy riguroso, una vez que la mezcla tibia enfría más lentamente que la mezcla en caliente.

En 2002, especialistas de los Estados Unidos empezaron a investigar esta técnica, que rápidamente sería adoptada por ese país. En Brasil, se empezó a investigar la tecnología, adaptándola para las condiciones de trabajo locales.

2.3.1.4. Mezcla asfáltica en caliente

Estas mezclas constituyen el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante bituminoso como ser el cemento asfáltico, de agregados pétreos e incluyendo el polvo mineral, y según el caso algún aditivo, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante.

Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados a una misma temperatura, por lo general mayor a 140°C y menor a 180°C, y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la temperatura ambiente.

2.3.1.4.1. Aspectos positivos y negativos de la mezcla en tibio (ventajas y desventajas)

Consumo de energía. La reducción del consumo de energía es el beneficio más obvio de las mezclas tibias y es discutido en la literatura como uno de los dos principales beneficios de ésta.

Los estudios han demostrado que la reducción del consumo de energía de alrededor de 30% se puede lograr mediante la reducción de las temperaturas de producción en la planta de asfalto. La reducción en el consumo de energía reduce a su vez el costo de la producción de la mezcla, pero puede haber también un añadido por reducción en los costos involucrados en el uso del proceso de mezcla tibia, es decir, para los aditivos y/o equipos de modificación.

Otro beneficio adicional de la reducción de las temperaturas de producción que a veces se menciona es el menor desgaste de la planta de asfalto.

Emisiones. Otra de las ventajas de la mezcla tibia es la reducción de las emisiones debido a la reducida temperatura de producción. De acuerdo a la literatura, la producción de mezcla tibia reduce significativamente las emisiones de gas carbónico y los olores, en comparación con la producción de mezclas en caliente.

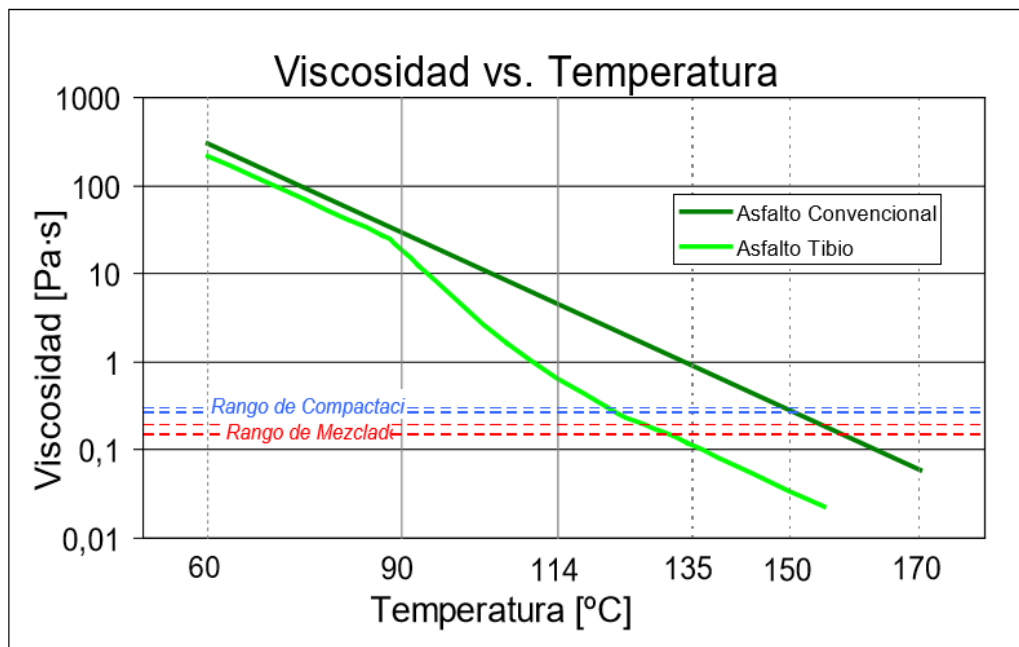
Cabe recordar que las emisiones de producción de mezcla - asfalto y la colocación pueden, en ciertos niveles elevados, ser perjudiciales para la salud.

En 2000, el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de EE.UU. publicó un estudio de riesgo sobre los efectos en la Salud Ocupacional de la exposición a la mezcla- asfalto. En esta revisión, el NIOSH evaluó los efectos potenciales para la salud de la exposición ocupacional a asfalto. En 1977, el NIOSH determinó que entre los efectos adversos para la salud por la exposición se encuentran la irritación de las membranas de la conjuntiva y el tracto respiratorio.

Viscosidad. La funcionalidad de las tecnologías de WMA (mezclas tibias) se basa en la reducción de la viscosidad del asfalto.

La viscosidad reducida permite al agregado ser totalmente cubierto a una temperatura inferior a lo que tradicionalmente se requiere en las mezclas de producción en caliente. Debido a la viscosidad reducida, los procesos de mezcla tibia pueden funcionar como una ayuda en la compactación y algunos beneficios relacionados con este son mencionados a menudo en relación con este tipo de mezclas.

Figura 2.2. Valores de viscosidad según temperatura de mezclas tibias y calientes.



Fuente: Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial – La.P.I.V. - Departamento de Construcciones - Facultad de Ingeniería –UNLP

Técnicos. Producción, colocación y compactación a temperaturas más frías, lo cual genera un control de densidades más eficaz.

Aumento en las distancias de transporte, dado que por la menor temperatura de producción hay una mayor conservación de la energía de compactación de los equipos, por tanto, se requiere menos esfuerzo para obtener las densidades requeridas, en otras palabras, los menores requerimientos de temperatura para la compactación de la mezcla,

agilizan el trabajo aumentando las distancias de cobertura de la mezcla asfáltica lo que se traduce en una disminución de los costos.

Se puede lograr también una apertura al tráfico en menor tiempo comparado con las mezclas en caliente y obtener una menor oxidación en el asfalto por los gradientes de temperatura.

Tradicionalmente, los fabricantes de mezclas asfálticas han buscado mejoras en los diseños y procesos de fabricación, encaminados a conseguir mejoras en los siguientes ámbitos:

Los compromisos medio-ambientales están llevando al mundo a menores temperaturas de mezclado. La reducción controlada de temperatura en la producción de mezcla asfáltica no afecta la calidad del pavimento gracias al aditivo que se utiliza.

Tomando en cuenta que día a día las reservas de petróleo en el mundo tienden a disminuir, por consiguiente, la obtención de sus derivados como lo es el asfalto, nace la necesidad de buscar nuevos métodos que mejoren las mezclas asfálticas.

Siendo el objetivo principal del ingeniero diseñador de mezclas asfálticas mejorar el comportamiento estructural de los pavimentos y ofrecer comodidad y seguridad al usuario, se requiere buscar la forma de modificar las propiedades mecánicas de la carpeta asfáltica, lo que se puede conseguir con el uso de métodos como el de mezclas asfálticas tibias.

Los cambios en diseño de mezclas asfálticas y la propuesta de uso de cualquier método novedoso deben estar enfocados a la reducción de costos de operación, el incremento de rendimientos de equipo y de mano de obra, además de cumplir con los requisitos de seguridad industrial, así como también trabajar en pro del cuidado medio ambiental.

Ventajas:

Reducción de emisiones producidas por el consumo de combustibles fósiles requeridos para generar el calor necesario para secar los agregados y producir la mezcla.

Reducción de los humos azules (componentes volátiles orgánicos) generados en la colocación de las mezclas asfálticas en caliente, con los cuales los trabajadores aspiran menos cantidades de los mismos.

Mayor trabajabilidad y compactibilidad de la mezcla. Mayor margen horario de trabajo para colocar las mismas.

Posibilidad de colocar la mezcla a menor temperatura ambiente y mayores distancias de acarreo.

Menor oxidación del asfalto (la mayor parte de la oxidación del mismo ocurre en la etapa de mezclado y compactación, debido a las altas temperaturas a la que es preparado al reducir la temperatura reducimos la velocidad de oxidación incrementando la vida del asfalto en el pavimento al hacerlo menos rígido)

Menor consumo de combustible por parte de la maquinaria debido a que con menos esfuerzo se obtienen altos valores de densidad de la mezcla.

Desventajas:

La implementación de estas tecnologías requiere de inversión en modificación de equipos, materiales y capacitación. Estos costos pueden compensarse eventualmente con la reducción en costos de combustible.

En este momento no se cuenta con suficientes datos a largo plazo para caracterizar claramente cómo se desempeñan las mezclas tibias. Existen estudios de laboratorio y evaluaciones a corto plazo en campo que han mostrado resultados positivos, pero se requiere de más tiempo para obtener una buena medida del desempeño esperado.

2.4. Ligantes asfálticos

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

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

Caracterización de los materiales asfálticos

Las propiedades y características de los materiales asfálticos dependen de su estructura y composición química; pero dada su gran complejidad, estos materiales se caracterizan mediante ensayos empíricos para valorar las propiedades que tiene que poseer para emplearse como ligantes en obra de carreteras.

Las propiedades fundamentales que tiene que poseer los asfaltos para su empleo en carretera son:

Carácter termoplástico: por acción de la temperatura su consistencia debe disminuir de manera que sean capaces de "mojar" y envolver los áridos. Al enfriarse debe adquirir la consistencia primitiva y dar cohesión a la mezcla.

Buen comportamiento mecánico y reológico para resistir las tensiones impuestas por el tráfico y poder mantener a las temperaturas de servicio, la estructura de la mezcla asfáltica.

Resistir al envejecimiento frente a los agentes atmosféricos y condiciones ambientales para conservar sus propiedades con el tiempo.

Es decir, que las propiedades fundamentales que deben poseer los asfaltos para emplearse en carreteras son: adhesividad a los áridos, buen comportamiento reológico y resistencia al envejecimiento.

2.5. Materiales pétreos

2.5.1. Definición de agregados pétreos

El agregado mineral, también conocido como roca, agregado pétreo o árido es cualquier material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria, y polvo de roca.

Los agregados son de gran importancia ya que constituyen entre el 90 y el 95 %, en peso, y entre el 75 y el 85 %, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante.

El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante de la estructura de pavimento.

2.5.2. Tipos de agregados pétreos

El tipo de agregado pétreo se puede determinar, de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, se pueden clasificar en los siguientes tipos:

a) Agregados naturales

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua y los químicos. La forma de las partículas individuales es un producto, a la larga, de los agentes que actúan sobre ellas. Así mismo, las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas. Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimentos son la grava y la arena.

La grava se define usualmente, como partículas de tamaño igual o mayor que 4,75 mm (N°4). La arena se define como partículas de un tamaño menor que 4,75 mm (N°4) pero mayor que 0,075 mm (N°200). Las partículas menores de 0,075 mm (N°200) son conocidas como relleno mineral (filler), el cual consiste principalmente de limo y arcilla. Las gravas y las arenas son clasificadas, además, de acuerdo a su origen. Los materiales producidos en canteras abiertas y usados sin ningún procesamiento adicional son conocidos como materiales en bruto, y los materiales tomados de la ribera de los ríos son conocidos como materiales de cantera de ríos.

Los depósitos de grava varían ampliamente en composición, pero usualmente contienen alguna cantidad de arena y limo. Los depósitos de arena también contienen, comúnmente alguna cantidad de arcilla y limo.

b) Agregados de trituración

Son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera o de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales. Acá se incluyen todos los materiales canterables cuyas propiedades físicas sean adecuadas.

Existen dos fuentes principales de agregados procesados o de trituración; estas son: gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimentos de mezcla asfáltica, y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que deben ser reducidos en tamaño antes de ser usados en la pavimentación.

La roca es triturada por tres razones: para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa, para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular, y para reducir y mejorar la distribución y el rango (graduación) de los tamaños de las partículas.

El propósito principal de la trituración, en el caso de los fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes, es reducir las piedras a un tamaño que sea manejable; sin embargo, los cambios en la textura superficial, y en la forma de las partículas, son también muy importantes.

El tamizado de los materiales, después de triturarlos, resulta en una granulometría con cierto rango de tamaño de partícula. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad consiste principalmente en mantener graduaciones específicas de agregados. Sin embargo, por razones de economía, el material triturado es utilizado tal como sale del triturador, con muy poco o ningún tamizado.

Un control adecuado de las operaciones de triturado determina si la graduación resultante del agregado cumple, o no, con los requisitos de la obra. El agregado triturado sin tamizar, es conocido como agregado triturado sin cribar y es usado satisfactoriamente en muchos proyectos de construcción de pavimentos. Sin embargo, es esencial garantizar que la operación de triturado sea continuamente supervisada para poder producir un agregado que cumpla con las especificaciones.

El triturado de algunos tipos de roca, como las calizas, produce cantidades substanciales de pequeños fragmentos y partículas. Esta fracción de material es separada de las partículas que tienen diámetros iguales o mayores a 6,35 mm (1/4"), casi siempre, y usada como agregado de arena triturada o procesada hasta tamaños máximos de 0,60 mm (N°30).

c) Agregados sintéticos o artificiales

Los agregados sintéticos o artificiales no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales. Algunos son subproductos de procesos industriales de producción como el caso del refinamiento de metales. Otros son

producidos mediante el procesamiento de materias primas, para ser usados específicamente como agregado.

El producto secundario más comúnmente usado es la escoria de alto horno. Es una sustancia no metálica que brota a la superficie del hierro fundido durante el proceso de reducción. Una vez que es removida de la superficie del hierro, la escoria es transformada en pequeñas partículas al temprarla inmediatamente en agua, o triturarla una vez se ha enfriado.

Los agregados sintéticos manufacturados son relativamente nuevos en la industria de la pavimentación, ellos son producidos al quemar arcilla, arcilla esquistosa, tierra diatomácea procesada, vidrio volcánico, escoria y otros materiales. Los productos finales son típicamente livianos y presentan una resistencia muy alta al desgaste. Los agregados sintéticos han sido usados en la pavimentación de cubiertas de puentes y cubiertas de techos, así como en capas superficiales de pavimento donde se requiere la máxima resistencia al deslizamiento.

d) Agregados marginales

Los agregados marginales engloban a todos los materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes.

2.5.2.1. Propiedades de los agregados pétreos

Las propiedades de los agregados pétreos se pueden conceptualizar bajo dos puntos de vista; uno como elementos aislados o individuales, y otro como conjunto.

Propiedades individuales

Los agregados como elementos aislados tienen propiedades físicas macroscópicas: dimensión, forma, redondez, densidad, propiedades de superficie, porosidad, permeabilidad, dureza superficial, modulo elástico, conductividad térmica, etc. Así mismo presentan unas propiedades químicas macroscópicas: solubilidad, alterabilidad, hinchamiento, etc.

Propiedades de conjunto

Las propiedades de conjunto de los agregados pétreos son sus características como un todo. La distribución de la redondez o desgaste de los agregados es una propiedad de gran interés, por cuanto va influir sobre el rozamiento entre los elementos del agregado.

2.5.3. Características principales de los agregados pétreos para pavimentos

En un pavimento densamente graduado de mezcla asfáltica, el agregado conforma el 90 a 95 %, en peso, de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento del pavimento. Sin embargo, además de la calidad, se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación.

Estos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado. Aún más, un agregado que cumple con los requisitos de costo y disponibilidad deberá poseer también ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para pavimento asfáltico de buena calidad.

Las propiedades más relevantes, consideradas para un agregado apropiado para concreto asfáltico de buena calidad son las siguientes:

- a) Graduación y tamaño máximo de partícula.
- b) Textura superficial
- c) Limpieza
- d) Capacidad de absorción
- e) Dureza
- f) Afinidad con el asfalto
- g) Forma de la partícula
- h) Peso específico

Cada una de estas propiedades importantes que debe poseer un agregado que será utilizado en pavimentación, se describen a continuación.

Graduación. - Todas las especificaciones de mezcla asfáltica requieren que las partículas de agregado, estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas, esté presente en ciertas proporciones mediante el cribado de los agregados

Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado, es comúnmente llamada graduación del agregado o gradación del agregado.

Es necesario entender cómo se mide el tamaño de partículas para determinar si la graduación del agregado cumple o no con las especificaciones.

Tamaño máximo de partícula. - El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado utilizado.

Existen dos formas de designar tamaños máximos de partículas, estos se describen a continuación:

Tamaño máximo nominal de partícula, designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.

Tamaño máximo de partícula, designado como un tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula, típicamente, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100% de las partículas de agregado.

Una mezcla de pavimentación, se clasifica de acuerdo a su tamaño máximo o a su tamaño máximo nominal.

La granulometría de las partículas es determinada por un análisis de tamices efectuado sobre las muestras de agregados. El análisis de tamices, consiste en pasar la muestra por una serie de tamices, cada uno de los cuales tiene aberturas de un tamaño específico.

Textura superficial. - La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento.

Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la del papel lija, aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro.

Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas.

Las gravas naturales son frecuentemente trituradas durante su procesamiento debido a que generalmente contienen superficies lisas. El trituramiento produce texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula.

No existe un método directo para evaluar la textura superficial. Es tan solo una característica, como la forma de la partícula, que está reflejada en los ensayos de resistencia y en la trabajabilidad de la mezcla durante la construcción.

Limpieza. - Las especificaciones de la obra, generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales extraños que adulteran el agregado, generalmente estos materiales extraños los constituyen: vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etc. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento.

La limpieza del agregado puede determinarse usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra de agregados antes de ser lavada es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0,075 mm (N° 200).

El ensayo “Finos plásticos en agregados graduados y suelos por el uso del ensayo del equivalente de arena” (AASHTO T 176), es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción (proporción) de agregado que pasa el tamiz de 4,75 mm (N° 4).

Capacidad de absorción. - Todos los agregados son porosos, y algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina su porosidad.

La capacidad de un agregado de absorber agua o asfalto, es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuara absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en la planta, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado.

Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso. Los agregados altamente porosos y absorbentes, no son normalmente usados, a menos de que posean otras características que los hagan deseables para su utilización en mezclas asfálticas, a pesar de su alta capacidad de absorción.

Dureza. - Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla de pavimentación, y durante la vida de servicio del pavimento.

Los agregados que están en, o cerca de la superficie, deben ser más duros, es decir deben tener más resistencia que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Esto se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito.

El ensayo de resistencia al desgaste de agregado grueso de tamaño pequeño por impacto y abrasión en la máquina de los Ángeles (AASHTO T 96), es la medida más común de la dureza en los agregados.

Este ensayo nos permite tener una idea, de la forma en que se comportaran los agregados, bajo los efectos de la abrasión causados por el tráfico, además nos proporciona una idea del grado de intemperismo que poseen los agregados.

Los agregados intemperizados, tendrán valores de desgaste elevados, por lo que su uso será limitado o nulo dentro de un proyecto de pavimentación. Por lo tanto, este valor, es muy utilizado como un indicador de la relativa calidad de los agregados a utilizarse en pavimentación.

Afinidad con el asfalto. - La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto, los agregados que tienen alta afinidad con el asfalto son conocidos como hidrofóbicos (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies.

Los agregados hidrofílicos (atraen el agua) tienen poca afinidad con el asfalto; por consiguiente, tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestos al agua. Los agregados silíceos como: la cuarcita y algunos granitos, son algunos ejemplos de agregados susceptibles al desprendimiento y deben ser usados con mucha precaución. No es muy claro por qué los agregados hidrofóbicos e hidrofílicos se comportan de tal manera. A pesar de esto, existen varios ensayos para determinar su afinidad con el asfalto y su tendencia al desprendimiento. En uno de estos ensayos, la mezcla de agregado-asfalto sin compactar, es sumergida en agua, y las partículas cubiertas son observadas visualmente. En otro ensayo, comúnmente conocido como ensayo de inmersión-compresión, dos muestras de mezcla son preparadas y una es sumergida en agua, posteriormente ambas son ensayadas para determinar sus resistencias. La diferencia en resistencia es considerada un indicativo a la susceptibilidad del agregado al desprendimiento.

Forma de la partícula

La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida, la forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida. Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas.

El mejor entrelazamiento ocurre con partículas de bordes puntiagudos y de forma cubica, producidas casi siempre, por procesos de trituración. Muchas de las mezclas asfálticas de pavimentación contienen partículas angulares y redondas, las partículas gruesas (grandes) de agregado, proporcionan la resistencia en el pavimento y provienen generalmente de piedra o grava triturada. Las partículas finas de agregado, suministran la trabajabilidad necesaria en la mezcla y generalmente provienen de arenas naturales.

La prueba de laboratorio más utilizada para medir la forma de las partículas es conocida como cubicidad de las partículas. Este método comprende el procedimiento de laboratorio para determinar las partículas chancadas (caras fracturadas), rodadas y lajeadas de la fracción retenida en la malla N°4 (4,75 mm) de una muestra de agregados pétreos.

Peso específico. - El peso específico de un agregado (también conocido como gravedad específica), es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. El peso específico es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados en la mezcla, de acuerdo al peso.

Una tonelada de agregado de bajo peso específico, tiene un volumen mayor (ocupa un mayor espacio) que una tonelada de agregado con un peso específico más alto.

Por consiguiente, para poder cubrir todas las partículas de agregado, más asfalto debe ser adicionado a una tonelada de agregado con bajo peso específico (mayor volumen) que a una tonelada de agregado con un peso específico más alto (menos volumen).

Otra razón importante por la cual es necesario conocer el peso específico de los agregados usados es: que este ayuda en el cálculo de porcentaje de vacíos de aire de las mezclas compactadas. Todas las mezclas de pavimentación deben incluir un cierto porcentaje (en

volumen) de vacíos o espacios de aire. Estos espacios desempeñan una labor importante en el pavimento terminado

La única manera de calcular el porcentaje de vacíos de aire en un volumen dado de mezcla de pavimentación, es midiendo el peso específico de una muestra de la mezcla de pavimentación y luego, restando de su valor, los pesos específicos del agregado y el asfalto que conformara la mezcla, el resultado es una indicación del volumen de vacíos de aire en la muestra. Todos los agregados son hasta cierto punto porosos.

Se ha desarrollado tres tipos de peso específico para tener en cuenta la porosidad del agregado, debido a que esta afecta la cantidad de asfalto que se requiere para cubrir las partículas de agregado y también el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla final; estos tres tipos son:

Peso específico Bulk.

Peso específico aparente.

Peso específico efectivo.

La determinación de esta propiedad (peso específico) incluyendo los tres tipos ya mencionados, se logra mediante el ensayo de Gravedad Especifica y Absorción del Agregado.

El peso específico total de una muestra incluye todos los poros de la muestra. El peso específico aparente no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros y espacios capilares que se llenarían de agua al saturar la muestra.

El peso específico efectivo excluye, del volumen de la muestra, todos los poros y espacios capilares que absorben asfalto. Ninguna de estas suposiciones, excepto en casos muy raros, es verdadera; sin embargo, el peso específico efectivo, el cual discrimina entre poros permeables al agua y poros permeables al asfalto, es el que más se acerca al valor correcto que debe ser usado en los cálculos de mezclas asfálticas.

2.5.4. Conceptos más frecuentes relacionados a los agregados

Agregado Grueso: Agregado que pasa el tamiz de 3'' y queda retenido en el tamiz de 4,75 mm (N° 4) normalmente son obtenidos de gravas naturales de lechos de río, socas trituradas o de gravas triturada y zarandeadas.

Agregado Fino: Agregado que pasa el tamiz de 4,75 mm (N° 4) y queda retenido en el tamiz de 75µm (N° 200)

Polvo Mineral: La porción de agregado fino que pasa el tamiz N° 200

Relleno Mineral: Producto mineral finamente dividido en donde más del 70% pasa el tamiz de 75µm (N° 200).

Agregado de Graduación Gruesa: Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños gruesos.

Agregado de Graduación Fina: Agregado cuya graduación es continua desde tamaños gruesos hasta tamaños finos, y donde predominan los tamaños finos.

Agregado Densamente Graduado: Agregado con una distribución de tamaños de partícula, tal que cuando es compactado, los vacíos que resultan entre las partículas expresados como un porcentaje del espacio total ocupado, son relativamente pequeños.

Agregado de Graduación Abierta: Agregado que contiene poco o ningún ligante mineral, y donde los espacios de vacíos en el agregado compactado son relativamente grandes.

Grava triturada: Son piezas trituradas de canto rodado, o grava para hacerlo más apropiado para su uso en mezclas asfálticas para pavimentación. La calidad puede ser mejorada por medio de la 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 tienen una o más caras fracturadas, tiene que ser mayor a 75% del peso total de las partículas retenidas en el tamiz de 4.75 mm. Sin otro procesamiento, este producto de grava triturada o chancada se llama triturado sin cribar.

Figura 2.3. Planta de áridos comunidad Charaja



Fuente: Elaboración propia

Figura 2.4. Toma de muestras. (Planta de áridos comunidad Charaja)



Fuente: Elaboración propia

2.6. Aditivos asfálticos

2.6.1. Descripción del producto aditivo Zycotherm

- a) Aditivo multipropósito para asfaltos a base de organosilanos a escala nanométrica que proporciona una mayor duración del concreto asfáltico a tiempo que mejora los procesos de fabricación extendido y compactado incluso a bajas temperaturas.
- b) En mezcla con el betún: El organosilano produce una micelación de asfaltenos, disminuyendo la tensión superficial y mejorando su trabajabilidad.
- c) En mezcla con el árido: El organosilano arrastra los asfaltenos y los pega a la superficie del árido a tiempo que cubre los grupos silanol con superficies afines al betún.

Es un aditivo tanto orgánico como mineral ya que es un organosilano de color amarillo pálido. Su principal función es mejorar la adherencia entre los agregados a menores temperaturas, pudiendo generar mezclas asfálticas a menores temperaturas con el mismo comportamiento.

Tabla 2.2. Especificaciones del Aditivo Zycotherm

Características Zycotherm	Valor o descripción
Apariencia	Líquida
Color	Amarillo pálido
Densidad (25°C)	1.01 g/mL
Punto de congelación	5-7°C
Viscosidad a 25°C	Menor a 300 cP
Solubilidad	Soluble en agua
Flamabilidad	Inflamable a 80°C

Fuente: (Zydex, 2014)

El aditivo Zycotherm tiene comportamiento funcional diferente, según la secuencia de fabricación:

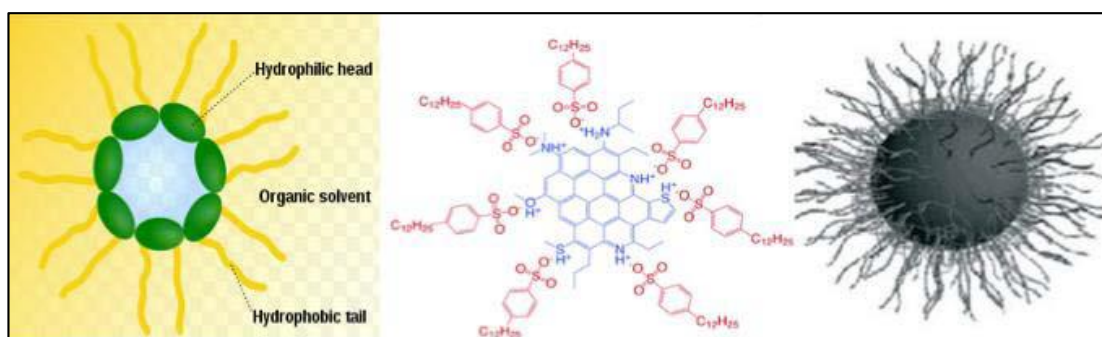
Fase 1: En la base de ligante (Antes del mezclado): Micelación de asfaltenos

La composición genérica del betún se divide en dos tipos diferentes de compuestos:

- Los maltenos, que son fundamentalmente carentes de polaridad
- Los asfaltenos, que son compuestos polares

La molécula de Zycotherm tiene una parte orgánica extremadamente compatible con los maltenos y una parte polar. Al añadir Zycotherm en el betún, se produce una micelación de los asfaltenos, que quedan recubiertos por los organosilanos. Cuando se micelan los asfaltenos, se reduce la atracción entre los mismos y se mejora la trabajabilidad del betún que antes estaba limitada por la atracción polar entre los asfaltenos. Esto repercute en una mayor fluidez y facilidad de recubrimiento incluso a bajas temperaturas debido a que los asfaltenos pueden moverse más libremente entre las resinas.

Figura 2.5. Esquema de proceso de reducción de atracción entre asfaltenos

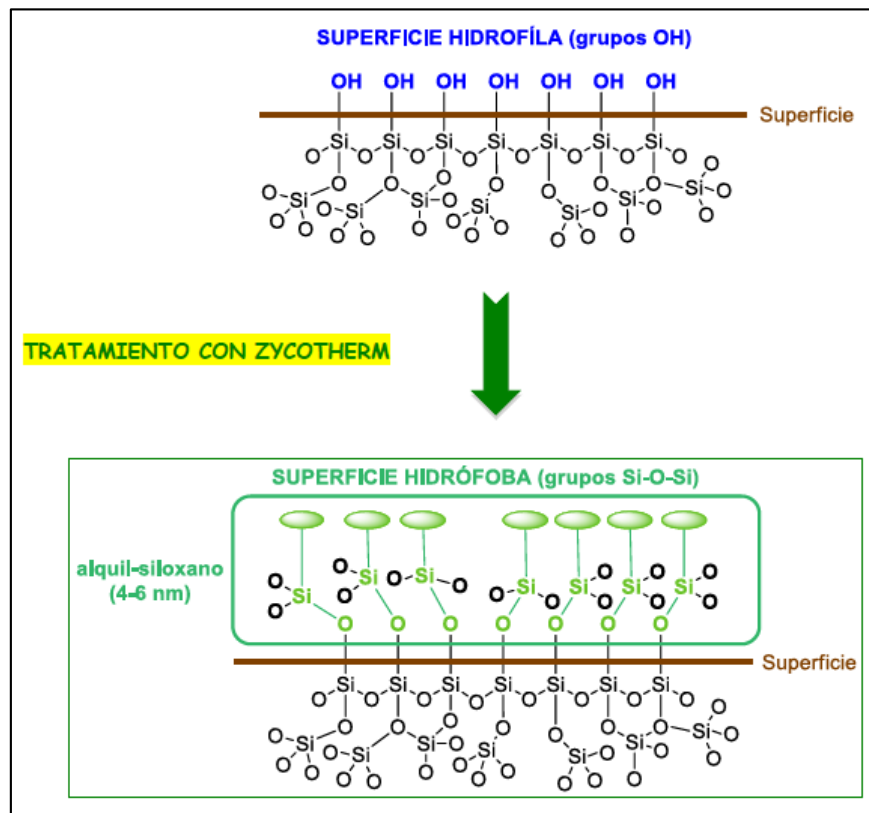


Fuente: (Zydex, 2014)

Zycotherm reacciona a nivel molecular con la superficie de los áridos, formando enlaces de tipo siloxano (Si-O-Si), de elevada fortaleza. Esto provoca una modificación de los áridos, convirtiéndolos en superficies hidrófobas y mejorando por ello su adhesividad al betún. Mediante la acción de Zycotherm, la unión árido betún se produce a nivel químico, y por lo tanto permanente, mejorándose así la resistencia del pavimento a los agentes degradantes habituales (agua, viento, agentes químicos, etc.).

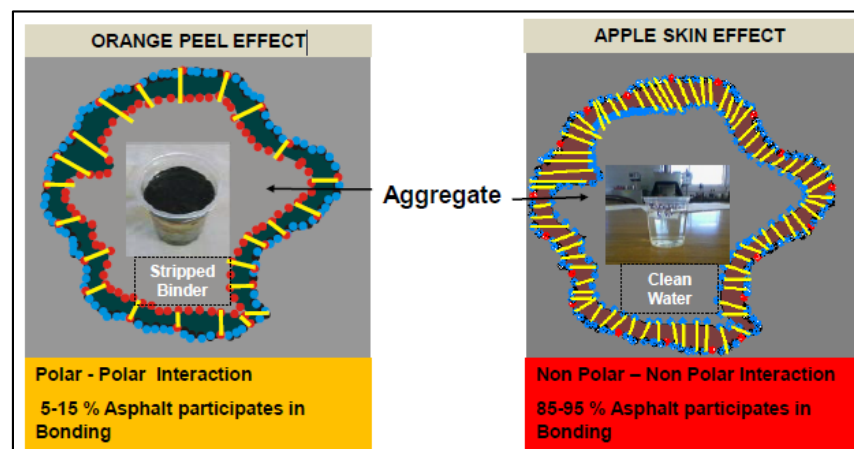
La capa hidrófoba que cubre a los áridos los convierte en superficies apolares, lo que explica su compatibilidad con los betunes y asfaltos. Esto aporta en su adhesividad, generando uniones árido – betún entre 10 a 20 veces mayores que si no se adicionara aditivo. Este efecto conocido como efecto cáscara de Naranja a cáscara de manzana, es precisamente lo que explica el cambio del “pelado” del recubrimiento de bitumen de un agregado al pasar de una superficie polar a una apolar. (Zydex, 2014).

Figura 2.6. Esquema de paso de una superficie de árido, de hidrófila a hidrófoba con el uso de Zycotherm



Fuente: (Zydex, 2014)

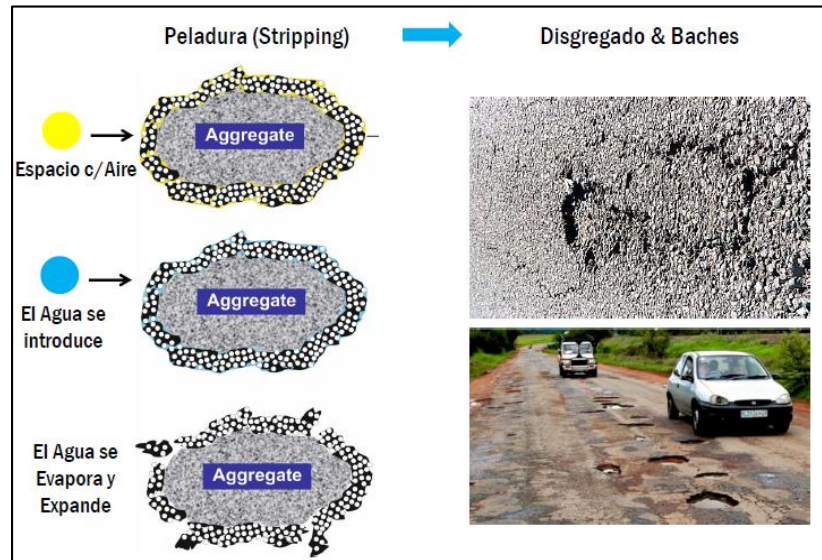
Figura 2.7. Cambio de polaridad en los agregados al adicionar el aditivo Zycotherm



Fuente: (Zydex, 2014)

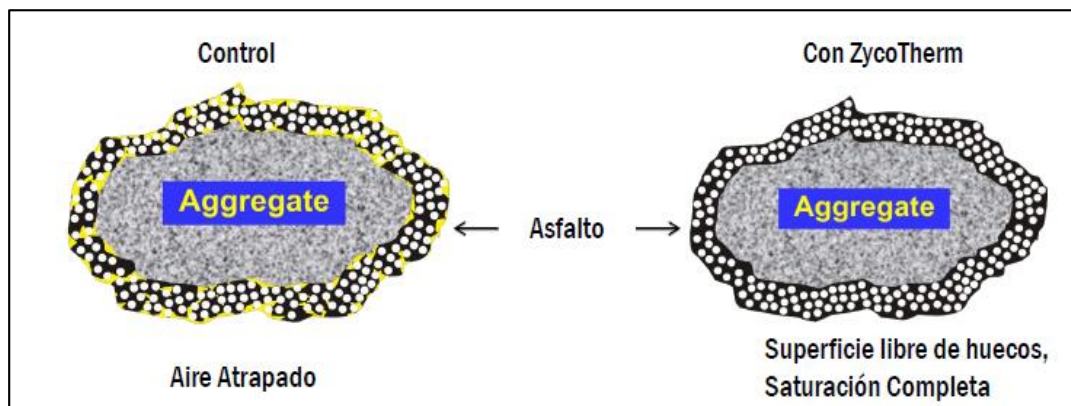
Con la adición de Zycotherm, debido a la menor tensión superficial del asfalto, el agregado se recubre mejor. Esto resulta en un mejor embebido y saturación de los microporos de la superficie del agregado. Teniendo esta mejora en la adherencia entra árido – ligante, la susceptibilidad a la humedad reduce, lo que implica menos segregación y baches.

Figura 2.8. Adherencia agregado – asfalto sin Zycotherm



Fuente: (Zydex, 2014)

Figura 2.9. Adherencia agregado – asfalto con Zycotherm



Fuente: (Zydex, 2014)

Figura 2.10. Aditivo multipropósito Zycotherm (presentación de laboratorio)



Fuente: Elaboración propia

Figura 2.11. Aditivo multipropósito Zycotherm (presentación de 20lt)



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

DISEÑO MARSHALL DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS CON Y SIN USO DEL ADITIVO ZYCOTHERM

3.1.Introducción

El diseño de mezclas asfálticas en tibio se basa en el método Marshall, donde se analizará el comportamiento de las mezclas tibias con el aditivo Zycotherm y serán comparadas con mezclas con menor y mayor temperatura del rango de mezclas tibias, para observar el comportamiento del aditivo, manteniendo constante la granulometría de diseño para ambos tipos de mezclas. Las mezclas asfálticas en tibio serán analizadas con el aditivo Zycotherm a diferentes temperaturas: a 80°C, 90°C, 100°C, 110°C, 120°C, 130° C, 140°C, 150°C y 160°C, para poder ver la incidencia de la temperatura de mezclado.

3.2.Especificaciones técnicas

Las especificaciones de los componentes de la mezcla asfáltica como ser agregados, cemento asfáltico y aditivo Zycotherm se describen a continuación:

3.2.1. Especificaciones técnicas del ligante asfáltico

El cemento asfáltico fue proporcionado por la planta de SE.DE.CA. de Charaja, el cemento asfáltico es tipo 85/100, de origen brasilero y debe cumplir las especificaciones de calidad de la norma AASHTO y/o ASTM.

Las especificaciones según normas de un ligante asfáltico son los siguientes:

Tabla 3.1. Ensayos de laboratorio normalizados para asfaltos.

Ensayo de laboratorios para asfaltos	Norma	Propósito
Viscosidad	AASHTO 201 ASTM D 2170	En el diseño de mezclas asfálticas la temperatura de mezclado y compactación se definen en función de la viscosidad que posee el cemento asfáltico ya que la trabaje trabajabilidad de una mezcla asfáltica se ve influenciada por la trabajabilidad que el asfalto tenga dentro de esta misma a una temperatura determinada de trabajo. Este ensayo se usa para clasificar los cementos asfalticos a viscosidad de 60 grados mide la consistencia de los cementos asfalticos

Penetración	AASHTO T49 ASTM D 5	Clasifican los asfaltos en grados según su dureza o consistencia medida en décimas de milímetros valores altos de penetración indicarán consistencia suaves
Punto de inflamación	AASHTO T4 ASTM D 92	Tiene por propósito identificar la temperatura a la cual el asfalto puede ser manejado y almacenado sin peligro que se inflamen. El punto de inflamación se mide por ensayo en copa abierta Cleveland
Ductilidad	AASHTO T 51 ASTM D 113	Provee una medida de las propiedades al estiramiento de los cementos asfálticos y el valor resultante puede ser usado como criterio de aceptación del material asfáltico ensayado. Se considera la ductilidad como la capacidad que tiene el asfalto de resistir esfuerzos de estiramiento bajo condiciones de velocidad y temperatura especificada
Punto de reblandecimiento	AASHTO T53 ASTM D 36	La temperatura determinada como de reblandecimiento representa aquella a la cual un cemento asfáltico alcanzar a un determinado estado de fluidez, existiendo consecuentemente una pérdida de consistencia del mismo. El punto de reblandecimiento es una prueba de resistencia a la deformación del cemento asfáltico y además también es una prueba de la viscosidad.
Ensayo de flotación	AASHTO T50 ASTM D 139	Esta prueba caracteriza el comportamiento al flujo o consistencia de ciertos materiales bituminosos que por su bajo grado de dureza no pueden ser ensayados utilizando el método de penetración. Este ensayo es utilizado para medir la consistencia del residuos de destilación de los asfaltos rebajados de fraguado lento
Solubilidad en tricloroetileno	AASHTO T44 ASTM D 2042	Este ensayo indica la porción de constituyentes sementales activos en el asfalto ensayado es decir se utiliza para medir la pureza del asfalto. En esta prueba las sales el carbono libre y los contaminantes inorgánicos se consideran impurezas
Peso específico	AASHTO T 228 AASHTO T 85 AASHTO T 84	El peso específico de un cemento asfáltico no se indica normalmente en las especificaciones de la obra pero existen dos razones por las cuales se debe conocer su valor y son: • Las medidas del peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura volumen. • Es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos de un pavimento compactado. Se determina normalmente por el método del picnómetro.
Endurecimiento y envejecimiento	AASHTO T 51 ASTM D 113	Tiene por propósito exponer una o varias muestras a condiciones similares ocurridas durante las operaciones de plantas de mezclado en caliente.

Fuente: Instituto de asfalto

Tabla 3.2. Requisitos de calidad para cemento asfáltico, clasificado por viscosidad dinámica a 60°C

Características	Clasificación			
Del cemento original	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Viscosidad dinámica a 60° C; Pa. s(P ⁽¹⁾)	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1000 ± 200)	200 ± 40 (2000 ± 400)	300 ± 60 (3000 ± 600)
Viscosidad cinemática a 135 °; mm ² /s, mínimo (1mm ² /s=1 centistoke)	175	250	300	350

Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C; s, mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25°C, 100 g, 5s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	140	80	60	50
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo.	177	219	232	232
Solubilidad, %, mínimo	99	99	99	99
Punto de reblandecimiento, °C	37-43	45-52	48-56	50-58
Del residuo de la prueba de la película delgada				
Perdida por calentamiento, % máximo	1	0,5	0,5	0,5
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa. s(P ⁽¹⁾), máximo	200 (2000)	400 (4000)	800 (8000)	1200 (12000)
Ductilidad a 25 °C y 5 cm/min; cm, mínimo	100	75	50	40
Penetración retenida a 25°C; %, mínimo	46	50	54	58

Fuente: SCT, 2005

3.2.2. Especificaciones técnicas de los agregados pétreos

Para el presente estudio, se procede a cumplir con las siguientes especificaciones del agregado proporcionado por la chancadora de Charaja de la planta de SE.DE.CA.

Agregado grueso. El agregado grueso debe estar compuesto de roca chancada, en ningún caso debe ser canto rodado, o por lo menos no debe ser mayor al 10% de canto rodado, y debe contar con : tamaño máximo: 25 mm (1pulg), abrasión: 40% máximo y caras fracturadas: 75% mín.

Agregado fino. La porción de agregados que pasa la malla No. 8 se denominará agregado fino y podrá estar compuesto por arena natural, triturados de piedra o de una combinación de ambos. En ningún caso se aceptará un contenido de arena natural mayor al 13 %. Los agregados finos deben tener granos limpios, compactos, angulares y de superficie rugosa, carentes de terrones de arcilla u otras sustancias inconvenientes, debiendo cumplir con el equivalente de arena: 45% mínimo. El agregado fino, incluyendo cualquier material de relleno mezclado, debe ser no plástico.

Relleno mineral (Filler). El material de relleno de origen mineral que sea necesario emplear, se compondrá de polvo calcáreo, roca dolomítica, cemento Portland u otros elementos no plásticos, provenientes de fuentes de origen aprobados por el Supervisor. Estos materiales deben carecer de materias extrañas y objetables, serán secos y libres de

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

Tabla 3.3. Ensayos de laboratorio normalizados para agregados

Ensayo de laboratorio para agregados	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T 27 ASTM C136	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de la carpeta asfáltica es de primordial importancia porque en función de ellas se conoce de antemano qué clase de textura tendrá la carpeta.
Desgaste	AASHTO T96 ASTM C131	El objeto es conocer la calidad del material pétreo desde el punto de vista de su desgaste ya sea por el grado de alteración del agregado o por la presencia de planos débiles y aristas de fácil desgaste. Esta característica esencial cuando la agregado va a estar sujeto a desgaste por abrasión como en el caso de los pavimentos. Es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comportarán los agregados bajo los efectos de la oración causada por el tráfico además de la idea del grado de interperismo que poseen los agregados.
Sanidad usando sulfato de sodio	AASHTO T 104 ASTM C 88	Permite obtener la información de estabilidad de un agregado bajo la acción de los agentes atmosféricos los agregados inestables (se disgregan ante la presencia de condiciones atmosféricas desfavorables) resultan evidentemente insatisfactorios como agregados para mezcla en rodadura de pavimentos especialmente cuando éstos tendrán una gran porción de su superficie expuesta a los agentes atmosféricos el valor del error permisible no debe ser mayor del 0.5%.
Equivalente de arena	AASHTO T 176 ASTM D2419	Descubre el exceso de arcilla en los agregados, ya que es un medio rápido para separar las partículas más finas (arcillosas) de los granos más gruesos o de la arena
Cubicidad de partículas	ASTM D692	Se utiliza para determinar valores como el índice de laja y la cubicidad de las partículas que componen el material pétreo. Las partículas de los agregados deben ser limpias duras resistentes y durables por lo que debe evitarse las partículas débiles quebradizas o laminadas ya que son perjudiciales.
Gravedad específica y absorción de agregados gruesos y finos	AASHTO T 84 AASHTO T 84 ASTM C 127 ASTM C 128	La gravedad específica aparente se refiere a la densidad relativa del material sólido de las partículas constituyentes no se incluye aquí los espacios vacíos (poros accesibles) que contienen las partículas de los cuales son accesibles al agua. El valor de absorción es usado para calcular el cambio en el peso de un agregado provocado por el agua absorbida en los poros accesibles de las partículas que constituyen el material comparado con la condición seca cuando se evalúa el comportamiento del agregado con el agua durante un período largo tal, que se logre alcanzar el valor potencial de absorción del mismo.

Pesó unitario y vacío	AASHTO T 19 ASTM C 29M	En la práctica el valor de peso unitario es muy utilizado para realizar conversiones de volumen a pesos de los agregados a utilizar en las mezclas de concreto asfáltico. La dosificación óptima de mezclas de agregado para mezclas de superficie en pavimentos puede realizarse utilizando el método de pesos unitarios el cual consiste en elaborar una gráfica (parecida a la de Proctor) en la cual se grafica las proporciones de los agregados en las abscisas y los pesos unitarios en las ordenadas.
-----------------------	---------------------------	--

Fuente: Instituto de asfalto

Tabla 3.4. Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa

Malla	Designacion	Tamaño				
		12,5 mm (1/2 “)	19 mm (3/4”)	25 mm (1”)	37,5 mm (1 ½”)	50 mm (2”)
50	2					
37,5	1 ½				100	90-100
25	1			100	90-100	76-90
19	¾		100	90-100	79-92	66-83
12,5	½	100	90-100	76-89	64-81	53-74
9,5	3/8	90-100	79-92	67-82	56-75	47-68
6,3	¼	76-89	66-81	56-71	47-65	39-59
4,75	Nº 4	68-82	59-74	50-64	42-58	35-53
2	Nº 10	48-64	41-55	36-64	30-42	26-38
0,85	Nº 20	33-49	28-42	25-35	21-31	19-28
0,425	Nº 40	23-37	20-32	18-27	15-24	13-21
0,25	Nº 60	17-29	15-25	13-21	11-29	9-16
0,15	Nº 100	12-21	11-18	9-16	8-14	6-12
0,075	Nº 200	7-10	6-9	5-8	4-7	3-6

Fuente: SCT, 2003

Tabla 3.5. Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa

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

Fuente: SCT, 2003

3.2.3. Especificaciones técnicas del aditivo Zycotherm

Es un aditivo comercial multipropósito a base de organosilanos a escala nanométrica, para uso en mezclas asfálticas, de color amarillo pálido, proclamado de última generación, que proporciona una mayor duración del concreto asfáltico al tiempo que mejora los procesos de fabricación, extendido y compactado. Ayuda a obtener un contenido óptimo de cemento asfáltico, permite disminuir temperaturas de mezclado y promueve la adherencia.

Tabla 3.6. Especificaciones del Zycotherm

Característica	Zycotherm
Apariencia	Líquido amarillo pálido
Densidad (25°C)	1,01 g/cm ³
Punto de congelación	5-7°C
Viscosidad a 25°C	Menor de 300 cps
Solubilidad	Soluble en agua
Flamabilidad	Inflamable a 80°C

Fuente: (Zydex industries, s.a)

3.3.Diseño de mezclas asfálticas

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

- Suficiente asfalto para asegurar durabilidad.
- Suficiente estabilidad para satisfacer las demandas de tráfico sin distorsión o desplazamientos.
- Suficiente manejabilidad para permitir la colocación de la mezcla sin segregación.
- Los materiales propuestos a usarse satisfagan los requisitos de las especificaciones del proyecto.

e) Las combinaciones de agregados satisfagan la granulometría requerida en las especificaciones.

f) Las gravedades específicas de masa de todos los agregados usados y la gravedad específica del asfalto sean determinados para poderse usar en los análisis de densidad y vacíos.

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

3.3.1. Método Marshall

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

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

3.3.1.1. Características de la mezcla para aplicar el diseño Marshall

Densidad. - Está definida como su peso unitario, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. La densidad es una característica importante para obtener un rendimiento duradero. Si la densidad es baja la cantidad de vacíos son mayores, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua. Si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrara en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura más durable. La densidad de la muestra compactada se expresa

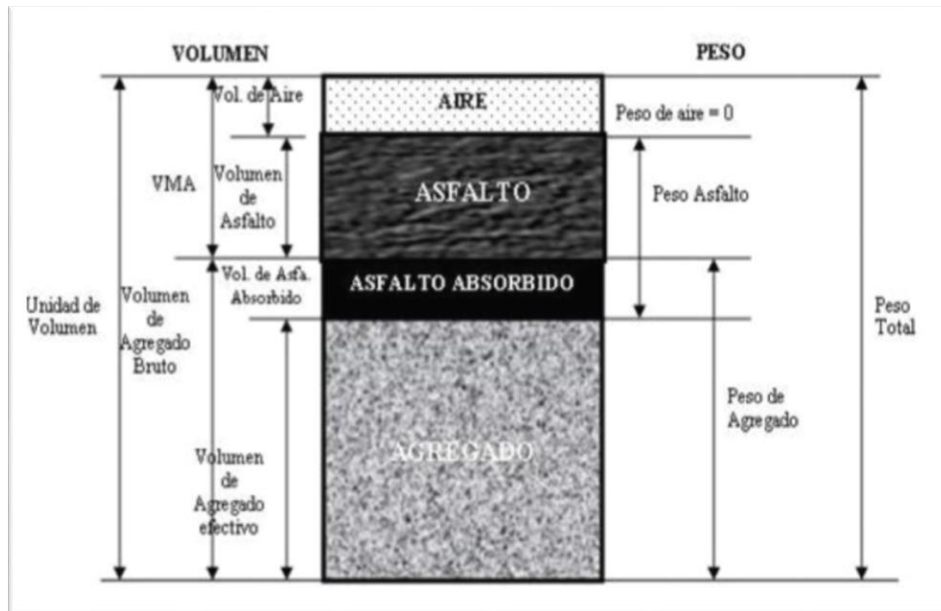
en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (lb/pie^3), es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ($1,000 \text{ kg/m}^3$ o 62.416 lb/pie^3). La densidad patrón obtenida en laboratorio se utiliza como referencia para determinar si la densidad del pavimento compactado en la obra es adecuada o no. Difícilmente en la compactación in-situ se obtiene la densidad patrón, por lo tanto, las especificaciones permiten un porcentaje aceptable.

Vacíos de aire. - Están presentes entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada y son pequeños espacios de aire, o bolsas de aire. Es de mucha importancia que las mezclas densamente graduadas contengan determinado porcentaje de vacíos, ya que estos permiten que el asfalto fluya durante la compactación adicional debido al tráfico. El porcentaje, en muestras elaboradas en laboratorio, para capas de base y capas superficiales debe estar entre 3% y 5%. La permeabilidad de una mezcla asfáltica tiene relación con la durabilidad de un pavimento asfáltico. A mayor permeabilidad, mayor contenido de vacíos; permitiendo pasajes a través de la mezcla del agua y el aire causando un deterioro irreversible a la carpeta asfáltica. Por otra parte, un contenido muy bajo de permeabilidad, es decir bajo contenido de vacíos, tiende a producir exudación de asfalto. La exudación consiste en que el exceso de asfalto es exprimido, o expulsado fuera de la mezcla hacia la superficie. La relación de la densidad y el contenido de vacíos demuestra que, a mayor densidad, menor porcentaje de vacíos y a menor densidad, mayor porcentaje de vacíos en la mezcla. En campo las especificaciones para la densidad requieren acomodar el menor número posible de vacíos inferior al 8%.

Contenido de asfalto. - El contenido de asfalto de una mezcla en particular es establecido usando los criterios descritos por el método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran medida de su granulometría y la capacidad de absorción del agregado. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Si en una granulometría el porcentaje de finos es considerablemente alto, el área superficial total será mayor, requiriendo así mayor cantidad de asfalto para cubrir todas las partículas. Las mezclas gruesas exigen menos asfalto debido a que el área superficial total es menor. Si a la mezcla se le agrega pequeños incrementos de filler (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de $0,075 \text{ mm}$ ($\text{N}^\circ 200$)) existe una tendencia a absorber la mayor parte del contenido de

asfalto, resultando una mezcla inestable y seca. Caso contrario al efectuar pequeñas disminuciones de filler nos da como resultado una mezcla muy rica (húmeda).

Figura 3.1. Diagrama de componentes de una mezcla asfáltica en caliente



Fuente: César Castaneda. Universidad de El Salvador, 2011

Es así que los incrementos o disminuciones de filler causan cambios en las propiedades de la mezcla, llegando a variar de seca a húmeda. La capacidad de absorción del agregado en una mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Técnicamente se habla de dos tipos de asfalto al referirse al asfalto absorbido y el no-absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto: cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto: volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto. La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla.

Vacíos en el Agregado Mineral (VMA). - Son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto en una mezcla asfáltica

compactada de pavimentación. Es decir, el VMA es el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla. El volumen efectivo de asfalto es todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado. Si el VMA es mayor, existirá más espacio para la película de asfalto. Hay que tener en cuenta que entre más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado se obtiene mayor durabilidad de una mezcla. Por lo anteriormente descrito existen valores mínimos de VMA recomendados y especificados en función del tamaño del agregado. Puede resultar que para economizar el contenido de asfalto en un diseño de mezcla disminuyamos los valores de VMA establecidos como mínimos, siendo esto completamente perjudicial y dañino para la calidad de la carpeta asfáltica, obteniéndose películas delgadas de asfalto en el agregado y una mezcla de baja durabilidad y apariencia seca.

Definidas las características de la mezcla, conviene aclarar qué nos brinda el Método Marshall. Para una mezcla de áridos, que cumpla una especificación determinada con un tamaño máximo igual o menor a 25 mm, según sea usada para base o carpeta y según el tránsito que la solicitará, nos permitirá determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico. La energía de compactación de acuerdo al tránsito será de 50 ó 75 golpes normalizados por cara. El porcentaje de cemento asfáltico elegido será el que nos dé una mayor densidad de mezcla compactada; es decir la densidad máxima que se obtendrá en servicio, después de la compactación en la etapa constructiva y la producida por el tránsito. Es el porcentaje que corresponde a una máxima estabilidad y con un porcentaje de vacíos que representa el valor medio de los determinados en las especificaciones para el concreto asfáltico en estudio. Determinado el promedio de estos tres porcentajes de cemento asfáltico, se verifica si con dicho porcentaje el valor de fluencia cae dentro de los límites establecidos y si los V.A.M. para el tamaño máximo nominal del agregado pétreo usado son mayores que los mínimos indicados en el siguiente cuadro:

Se considera tamaño máximo nominal del agregado, el tamiz (o abertura en mm) que sigue en la serie al que permite pasar el 100%.

Si los V.A.M. no superan los valores establecidos, se deberá variar los porcentajes de los áridos utilizados o incorporar nuevos agregados para lograr una mezcla adecuada.

Tabla 3.7. Valores mínimos V.A.M. según el tamaño máximo nominal

Tamices	Tamaño máximo nominal(mm)	Minimos V.A.M.(%)
N° 16	1,18	23,5
N° 8	2,36	21,0
N° 4	4,75	18,0
3/8"	9,50	16,0
1/2"	12,50	15,0
3/4"	19,00	14,0
1"	25,00	13,0
1 1/2"	37,50	12,0
2"	50,00	11,5

Fuente: Instituto de asfalto

Vacíos Llenos de Asfalto VFA. - Son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA se calcula al restar los vacíos de aire del VMA, y luego dividiendo por el VMA, y expresando su valor como un porcentaje.

Estabilidad Marshall. - Es la carga máxima expresada en kg que puede resistir sin que se produzca falla una probeta preparada y ensayada en condiciones normalizadas.

Fluencia Marshall. - Es la reducción del diámetro de la probeta, expresada en cm, en el momento de alcanzar la carga máxima y en la dirección de ésta.

Relación betún-vacíos. - Expresa el porcentaje de los vacíos de los agregados minerales compactados, ocupados por el cemento asfáltico en la probeta.

Relación estabilidad-fluencia. - Razón entre carga máxima en kg y deformación en cm.

Relación filler-betún. - Es la relación en volumen del pasa tamiz N°200 del agregado sobre ese mismo pasa tamiz N°200, más el volumen de cemento asfáltico.

3.3.1.2. Preparación de las muestras de ensayo

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

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

Las mezclas se preparan de la siguiente manera:

a) El asfalto y el agregado se calientan y mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.

b) Las mezclas asfálticas calientes se colocan en moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de mezcla al golpearla.

c) Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50, ó 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente, un total de 70 golpes; una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos y una probeta de 75 golpes recibe 150 impactos. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

3.3.1.3. Procedimiento del ensayo

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

3.3.1.4. Ensayos de estabilidad y fluencia

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

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

a) Las probetas son calentadas en un baño de agua a 60° C (140° F). Esto representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.

- b) La probeta es removida del baño, secada, y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste en un dispositivo que aplica una carga sobre la probeta, y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).
- c) La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 in) por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta pueda resistir.
- d) La carga falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

3.3.1.5. Criterios para el diseño Marshall

Tabla 3.8. Requerimiento para mezclas con cemento asfáltico diseñadas con el método Marshall

Criterios para mezcla del Método Marshall	Transito liviano Carpeta y Base		Transito mediano Carpeta y Base		Tránsito pesado Carpeta y Base	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Compactación, numero de golpes en cada cara de la probeta	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N(lb)	336 (750)	-	5358 (1200)	-	8006 (1800)	-
Flujo, 0,25 mm (0,1 “)	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% VFA	70	80	65	78	65	75

Fuente: Instituto de asfalto

Tabla 3.9. Porcentaje mínimo de V.M.A.

Tamaño Máximo en mm porcentaje	VMA Mínimo, por ciento			
	Vacíos de diseño, por ciento³			
mm	pulg	3,0	4,0	5,0
1,18	N° 16	21,5	22,0	23,5
2,36	N° 8	19,0	20,0	21,0
4,75	N° 4	16,0	17,0	18,0
9,5	3/8	14,0	15,0	16,0
12,5	½	13,0	14,0	15,0
19,0	¾	12,0	13,0	14,0
25,0	1,0	11,0	12,0	13,0
37,5	1,5	10,0	11,0	12,0
50,0	2,0	9,5	10,5	11,5
63,0	2,5	9,0	10,0	11,0

Fuente: Instituto de asfalto**Tabla 3.10. Requerimiento para mezclas con Emulsión Asfáltica diseñadas con el
Método Marshall**

Propiedad a Evaluar	Mínimo	Máximo
Estabilidad N (lb) a 22,2 °C (72°F)	2224 (500)	-
Porcentaje de pérdida de Estabilidad ¹	-	50
Recubrimiento del Agregado (%)	50	-
1. Luego de saturar los vacíos y sumergir en agua el espécimen		

Fuente: Instituto de asfalto**3.3.1.6. Procedimientos para la determinación del porcentaje óptimo de ligante**

Existen cuatro procedimientos en el desarrollo del método de Marshall que conllevan a la obtención del porcentaje óptimo de ligante de la mezcla:

Determinación de la densidad aparente o peso específico total de probetas.

Determinación del contenido de vacíos de las probetas de cada serie del ensayo.

Ensayos de estabilidad y fluencia Marshall.

Aplicación de criterios para determinar el porcentaje óptimo de ligante.

La base del método es, como ya se dijo, el ensayo Marshall, que implica el moldeo y ensayo de probetas y la evaluación de los resultados obtenidos.

Las probetas de ensayo de las distintas series tentativas son preparadas con cantidades diferentes de asfalto. Como en las mezclas densas y semidensas el tenor de asfalto suele rondar el 5% en peso de la mezcla total, es común emplear 6 series de probetas que abarquen un abanico de porcentajes alrededor de este 6%. Una práctica habitual es fabricar probetas con 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%, aunque el rango de pruebas estará finalmente determinado en base a la experiencia previa que se tenga con los agregados disponibles y el tipo de mezcla a formular.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

1. El asfalto y la composición de los agregados se calientan por separado, a una temperatura similar, definida por la viscosidad del ligante que, para mezclas densas y semidensas, se sugiere que sea de 1,8 poise para el mezclado y cuyo valor surge del nomograma de Heukelom de viscosidades vs. temperaturas. Algunos investigadores aconsejan que la temperatura de áridos esté unos grados centígrados por debajo de la correspondiente al asfalto, más que nada para evitar el posible “choque térmico” que se daría si las partículas inertes tuviesen mayor energía calórica que el ligante y que derivaría en un envejecimiento prematuro de éste.
2. Luego se procede al mezclado en el laboratorio, que puede ser manual o, preferentemente, mecánico, hasta que todas las partículas de agregados estén recubiertas de asfalto. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
3. Se coloca la mezcla asfáltica caliente en un molde Marshall pre-calentado como preparación para la compactación. La cantidad de mezcla a colocar será tal que se asegure una altura final compactada de alrededor de 63,5 mm. Como el volumen de la probeta una vez desmoldada es de poco más de 500 cm³, conociendo las densidades individuales de los materiales y el valor medio de los límites de porcentaje de vacíos totales especificado es posible estimar esa cantidad de mezcla, el cual en general suele rondar los 1200 gramos.
4. Usando el dispositivo compactador Marshall (una especie de maza cilíndrica o martillo que se desliza por una guía y que se deja caer sobre la mezcla contenida en el molde), las probetas son compactadas mediante 50 o 75 golpes por cara, dependiendo de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Después de completada la compactación, las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

3.3.1.7. **Determinación de las densidades aparentes o pesos específicos de las probetas**

La densidad aparente de cada probeta se determina con las probetas compactadas ya desmoldadas estacionadas a temperatura ambiente.

Se trata de una medición de peso específico de un sólido, la “probeta”. Tal determinación es esencial para un análisis preciso de todos los parámetros volumétricos de interés.

El peso específico total o densidad aparente de cada probeta se obtiene con el peso de la misma en estado seco y calculando su volumen sumergiéndola en agua (previamente acondicionándola para alcanzar un estado de “saturado y a superficie seca”) y pesándola en tal condición, aplicando el Principio de Arquímedes.

Este dato constituye el primer parámetro volumétrico a obtener, que es en sí mismo una característica de la mezcla que se diseña pero que, además, sirve como dato necesario para el cálculo de los porcentajes de Vacíos Totales de la Mezcla, de los Vacíos del Agregado Mineral (VAM) y de la Relación Betún-Vacíos (RBV).

3.3.1.8. **Determinación de los vacíos de las series de mezclas de prueba**

Para obtener los parámetros volumétricos de la mezcla compactada se debe primeramente determinar la Densidad Máxima de la mezcla. Hay dos maneras de lograr esa Densidad Máxima. La primera, mediante la llamada “Densidad Máxima Teórica”, (Dm_t), suponiendo que en la probeta compactada no existieran vacíos, se calcula por la fórmula siguiente:

$$Dm_t = \frac{100}{\frac{P_1}{Peas_1} + \frac{P_2}{Peas_2} + \frac{P_3}{Peas_3} + \frac{P_4}{Pea_4} + \frac{P_5}{Pea_5}}$$

Donde:

$P_1, P_2, \dots, P_5$ son porcentajes en peso de los materiales que intervienen en la mezcla total .

$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 100$

$Peas_1, Peas_2, Peas_3$ = Peso específico del agregado seco (bulk) de cada uno de los agregados indicados.

Pea_4 = Peso específico aparente del relleno mineral.

Pea_5 = Peso específico absoluto del asfalto(en general, se utiliza 1,000gr/cm³)

La otra manera de determinar la Densidad Máxima es mediante el denominado “Ensayo Rice”, que consiste en pesar una cierta cantidad de mezcla y determinar su volumen sumergiéndola en agua y aplicando vacío con una bomba para retirar todo el aire de sus huecos. Esta “Densidad Máxima Rice”, D_{mr} , es de empleo habitual en los laboratorios de obra.

Con una u otra densidad máxima, se determinan los Vacíos Totales de la mezcla compactada. Para los Vacíos del Agregado Mineral (VAM) y la Relación Betún-Vacíos (RBV) se necesita, además, conocer el porcentaje de ligante de la mezcla.

Las probetas contienen vacíos en su interior, que son los huecos de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. Al respecto, pueden diferenciarse tres parámetros:

3.3.1.9. Determinación de los vacíos totales de la mezcla compactada

El porcentaje de vacíos de la mezcla compactada, $V[\%]$ (o “vacíos totales”, para diferenciarlos de los otros parámetros volumétricos que se detallarán posteriormente), se calcula a partir de la densidad aparente de cada probeta compactada y de la densidad máxima o peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Se expresa en porcentaje del volumen total e indica la diferencia relativa entre la densidad máxima (D_m) y la densidad de la probeta (d).

$$V[\%] = 100 \left(1 - \frac{d}{D_m} \right)$$

3.3.1.10. Determinación de los vacíos del agregado mineral (VAM)

Los vacíos en el agregado mineral, VAM, están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada.

Es, en rigor, una especie “abstracción”, no un estado real. Representa a la mezcla compactada, pero considerando como “vacíos” no sólo a los huecos de aire sino también al espacio ocupado en ella por el contenido efectivo de asfalto.

Los VAM se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada.

Es determinado con base en el peso específico total del agregado; puede ser calculado como la suma de los vacíos totales y los vacíos que dejaría el asfalto si pudiese ser quitado de la probeta compactada sin que ésta modificara su apariencia externa.

$$V.A.M. (\%) = V + (d \times CA)$$

Donde:

V = Vacíos de la mezcla compactada (en %)

d = Densidad de la probeta

CA = Porcentaje en peso del cemento asfáltico total; considerando el peso específico del mismo a 1,000 gr/cm³.

Es un parámetro muy importante. Los Pliegos suelen fijar su valor mínimo, pues de los VAM depende la capacidad de la mezcla de incorporar asfalto y de mantener un tenor mínimo necesario de vacíos totales.

3.3.1.11. Determinación de los vacíos ocupados por el ligante o relación betún/vacíos

Los vacíos ocupados por el ligante son denominados en nuestra lengua, habitualmente, “Vacíos Ocupados por Betún, VOB”. Significan, precisamente, el porcentaje de los vacíos del agregado mineral ocupado por asfalto en la mezcla compactada.

Es decir: los VMA abarcan asfalto y aire, y por lo tanto, los VOB se calculan como la proporción porcentual de los VMA que están efectivamente ocupados por el asfalto, y por eso a este valor se lo llama también como “Relación Betún/Vacíos” que, más adecuadamente, debería llamarse “relación entre el volumen ocupado efectivamente por el asfalto y el volumen de los VAM”.

Hay dos formas de calcularlo, que son equivalentes en cuanto a su resultado final:

$$VOB \text{ o } RBV [\%] = \frac{100 \times d \times CA}{V.A.M.} = \frac{(VAM - V)}{VAM} \times 100$$

3.3.1.12. Ensayos de estabilidad y fluencia Marshall

El ensayo mecánico Marshall simula la resistencia de la mezcla compactada a soportar cargas y su comportamiento plástico ante las solicitaciones.

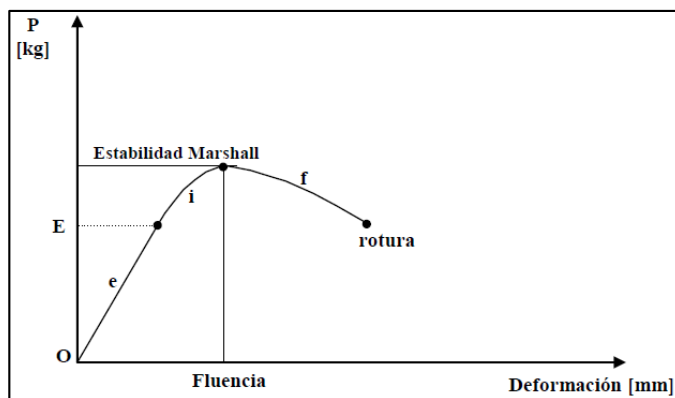
Los parámetros que se obtienen son dos: la “estabilidad” [kg o libras] y la “fluencia” [mm o centésimas de pulgada]; un valor complementario es la razón “estabilidad/ fluencia” [kg/cm o libras/centésimas de pulgada]. Los pliegos exigen valores límites a cumplir de estas tres medidas.

Para el ensayo, las probetas Marshall, previamente desmoldadas y estacionadas a temperatura ambiente, se mantienen durante 24 horas en un baño de agua a 60 °C el tiempo necesario para que la mezcla alcance dicha temperatura (las normativas suelen especificar entre 30 y 60 minutos). Inmediatamente después y sin dejar que la probeta se enfríe, se realiza el ensayo aplicando compresión diametral sobre una mordaza perimetral entre la cual se coloca la probeta, imponiéndose así condiciones de semiconfinamiento, con una velocidad de deformación lenta, cuasi-estática, de 50,8 mm/min.

Se define a la Estabilidad como la carga máxima que soporta la probeta, en tanto que la Fluencia es la lectura de deformación diametral vertical que se registra en el mismo instante en que se alcanza la carga máxima.

La curva de carga–deformación en el ensayo Marshall se observa en el gráfico de la figura. En la misma se ve que, antes de alcanzarse la carga máxima, aparecen deformaciones plásticas (irrecuperables) con expansión lateral y la falla se produce al vencerse la resistencia cohesiva y friccional que ofrece la probeta.

Figura 3.2. Gráfico del ensayo de Estabilidad y Fluencia Marshall



Fuente: Instituto de asfalto

Se nota un periodo de comportamiento cuasi-elástico e, existiendo proporcionalidad entre las cargas y las deformaciones hasta el punto indicado como E. Puede considerarse que en el segmento O-E las deformaciones son recuperables por elasticidad instantánea y/o retardada. Luego a partir del punto E y hasta alcanzar la carga máxima indicada en el gráfico como estabilidad Marshall, la curva toma la forma de una parábola presentando un período elasto-plástico i; las deformaciones son mayores en este período en relación al periodo elástico para iguales incrementos de carga con una pérdida de la reacción elástica, dado por la diferencia entre la curva real y la prolongación del segmento O-E. El momento en que se llega al máximo es aquel en que se destruye la estructura granular; la mezcla aquí ya se ha dislocado, o sea se ha producido la falla de la misma llegando al máximo valor de corte que puede resistir. Por último, la curva presenta un período en que la mezcla fluye plásticamente f, con una deformación de mayor magnitud en la parte descendente de la curva antes de la falla total. La fluencia Marshall es la deformación en correspondencia con la Estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación, existe una tendencia a pensar que es deseable un valor de estabilidad muy alto; esto se debe a que, para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad, pero sin embargo éste no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas, corrientemente, se obtienen a costa de durabilidad (envejecimiento prematuro) y/o de flexibilidad. Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio; mientras que aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse excesivamente bajo las cargas del tránsito. Por todo lo antedicho cobra relevancia la relación estabilidad/fluencia.

Con todos los datos se generan curvas que representan:

- 1.- Estabilidad vs. % Contenido de Ligante
- 2.- Fluencia vs. % Contenido de Ligante
- 3.- Densidad vs. % Contenido de Ligante
- 4.- Vacíos vs. % Contenido de Ligante
- 5.- V.A.M. vs. % Contenido de Ligante

6.- R. B.V. vs. % Contenido de Ligante

Se observan las siguientes tendencias:

- 1.- La estabilidad aumenta con el tenor cemento asfáltico, hasta un cierto máximo y luego decrece.
- 2.- La fluencia aumenta con mayores porcentajes de CA, observándose que una vez alcanzado el óptimo, crece más marcadamente.
- 3.- La curva de densidad vs. % CA es similar a la correspondiente a la estabilidad; observándose en general que la máxima densidad corresponde a un tenor de CA un poco mayor que el de la mayor estabilidad.
- 4.- El porcentaje de vacíos decrece con el aumento del porcentaje del CA. En la gráfica se ven dos curvas, una con valores calculados a partir de la densidad máxima Rice y la otra con la densidad máxima teórica.
- 5.- El porcentaje de V.A.M. decrece hasta un mínimo y luego aumenta para mayores tenores de C.A.
- 6.- La relación Betún-Vacíos crece con el aumento del porcentaje de C.A.

Con los datos obtenidos en los gráficos anteriores, se calcula el contenido óptimo de asfalto aplicando alguno de los criterios de dosificación. El más utilizado en nuestro medio es el que promedia los siguientes valores:

- a) El porcentaje de asfalto que corresponda a la mayor densidad.
- b) El contenido de asfalto que corresponda a la mayor estabilidad.
- c) El porcentaje de asfalto que corresponda al valor medio de los vacíos totales fijados como límites en las especificaciones de la mezcla en estudio (usualmente se exige entre 3% y 5%, por lo tanto, el valor medio sería de 4%).

Determinado el promedio de estos tres porcentajes de cemento asfáltico, se verifica si con dicho porcentaje los valores de Fluencia, VAM y RBV se ubican dentro de los límites establecidos por las especificaciones. Por ejemplo, suele exigirse una Fluencia entre 2 mm y 4,5 mm, V.A.M. mayores que 14% y RBV entre 75% y 85%. Si los resultados no se encuadran dentro de lo establecido, se deberá variar los porcentajes de los áridos utilizados o incorporar nuevos agregados para lograr una mezcla adecuada.

3.4. Selección de materiales

3.4.1. Agregados pétreos

El material pétreo, es extraído del lecho del río Camacho, para luego ser procesado y almacenado en la chancadora de Charaja que se encarga de la provisión de material para la SEDECA del departamento de Tarija. Para la obtención de los agregados pétreos, se procedió a pedir la provisión de los mismos al encargado de la chancadora, quien proporcionó muestras de grava, gravilla y arena, con un tamaño máximo de 1" necesario para diseñar las mezclas con el método Marshall.

3.4.2. Materiales bituminosos

Los materiales a utilizar deben cumplir ciertas especificaciones de las Normas ASTM y AASHTO. Para el presente proyecto utilizamos materiales existentes en la ciudad de Tarija que se ajustan dentro de las normativas vigentes; además de tener disponibilidad. El cemento asfáltico C.A. 85-100 con nombre Betunel, de procedencia brasilera, también proporcionado por la misma institución; siendo los mismos analizados en laboratorio de Asfaltos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Figura 3.3. Muestra de Cemento Asfáltico 85/100



Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Material aditivo Zycotherm

Figura 3.4. Muestra de producto aditivo Zycotherm



Fuente: Elaboración propia

3.5. Caracterización de materiales

3.5.1. Caracterización de materiales pétreos

3.5.1.1. Granulometría

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

Figura 3.5. Lavado de la muestra para granulometría



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6. Juego de tamices para granulometría



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7. Obtención de pesos retenidos en cada tamiz



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica:

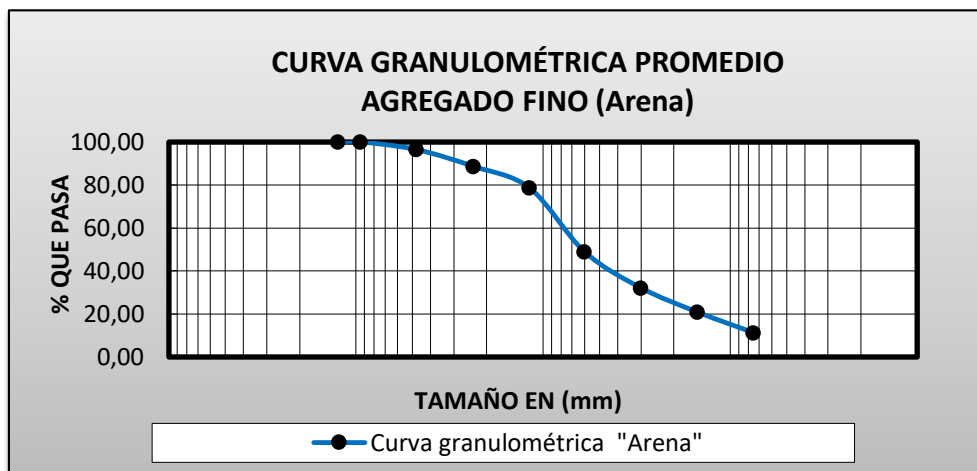
a) Granulometría del agregado fino (arena):

Tabla 3.11. Granulometría promedio de la arena

Peso Total (gr.)			5000		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1/2	12,5	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº4	4,75	179,93	179,93	3,60	96,40
Nº8	2,36	388,73	568,67	11,37	88,63
Nº16	1,18	504,37	1073,03	21,46	78,54
Nº30	0,60	1481,60	2554,63	51,09	48,91
Nº50	0,30	838,73	3393,37	67,87	32,13
Nº100	0,15	561,83	3955,20	79,10	20,90
Nº200	0,075	480,60	4435,80	88,72	11,28
BASE	-	564,20	5000,00	100,00	0,00
SUMA		5000,0			
PÉRDIDAS		0,0			
MF =		3,55			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1. Curva granulométrica promedio de la arena



Fuente: Elaboración propia

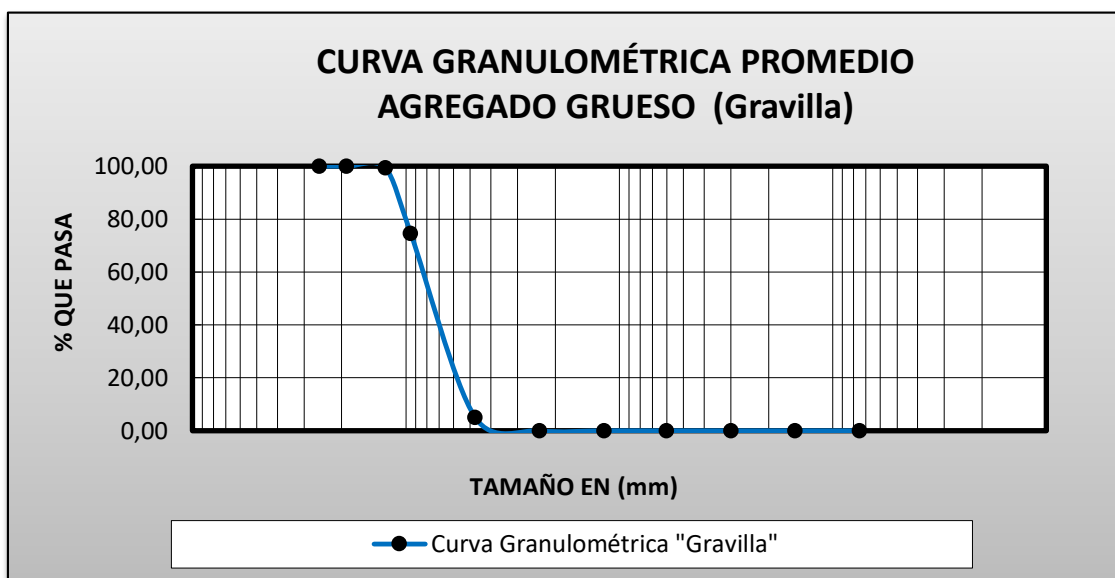
b) Granulometría del agregado grueso (gravilla):

Tabla 3.12. Granulometría promedio de la gravilla

Peso Total (gr.)			5000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,5	33,20	33,20	0,66	99,34
3/8"	9,50	1238,30	1271,50	25,43	74,57
Nº4	4,75	3471,33	4742,83	94,86	5,14
Nº8	2,36	257,17	5000,00	100,00	0,00
Nº16	1,18	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº30	0,60	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº50	0,30	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº100	0,15	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº200	0,075	0,00	5000,00	100,00	0,00
BASE	-	0,00	5000,00	100,00	0,00
SUMA		5000,0			
PÉRDIDAS		0,0			
MF =		6,20			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.2. Curva granulométrica promedio de la gravilla



Fuente: Elaboración propia

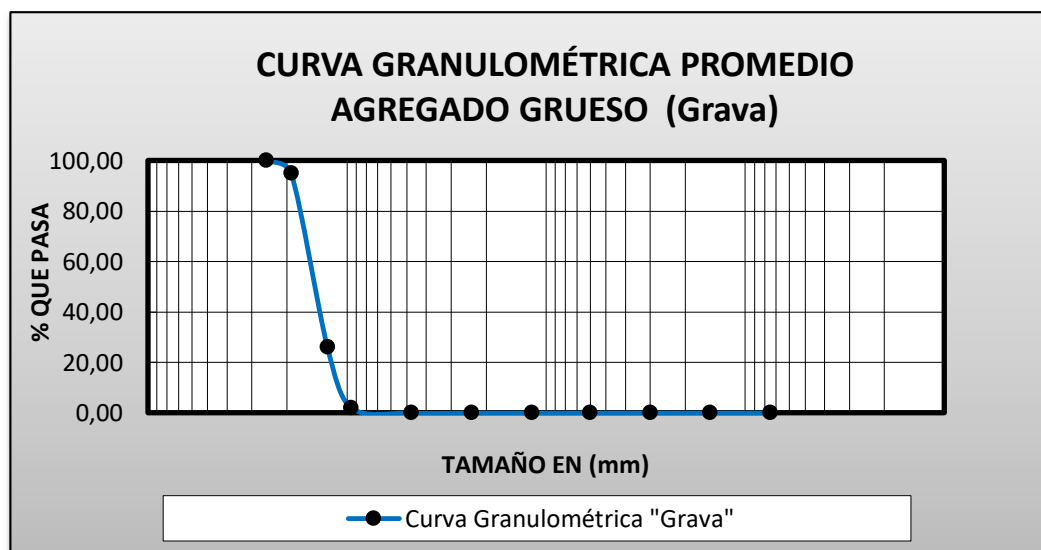
c) Granulometría del agregado grueso (grava):

Tabla 3.13. Granulometría de la grava

Peso Total (gr.)		5000			
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa del total
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	251,70	251,70	5,03	94,97
1/2"	12,5	3444,60	3696,30	73,93	26,07
3/8"	9,50	1200,27	4896,57	97,93	2,07
Nº4	4,75	101,80	4998,37	99,97	0,03
Nº8	2,36	1,63	5000,00	100,00	0,00
Nº16	1,18	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº30	0,60	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº50	0,30	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº100	0,15	0,00	5000,00	100,00	0,00
Nº200	0,075	0,00	5000,00	100,00	0,00
BASE	-	0,00	5000,00	100,00	0,00
SUMA		5000,0			
PÉRDIDAS		0,0			
MF =		6,98			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.3. Curva granulométrica promedio de la grava



Fuente: Elaboración propia

3.5.1.2. **Peso específico del agregado fino (arena)**

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

Figura 3.8. Verificación de la condición muestra saturada con superficie seca



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica:

a) Peso específico de la arena:

Tabla 3.14. Peso específico de la arena

Muestra N°	Peso muestra "b" (gr)	Peso del matraz (gr)	Peso muestra + matraz + agua "c" (gr)	Peso del agua agregado al matraz (gr)	Peso muestra secada "a" (gr)	Volumen del matraz (cm ³)	P. E. Saturado a granel (gr/cm ³)	P. E. Saturado con sup. Seca (gr/cm ³)	P. E. Aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	500	172,2	993,1	320,90	493,90	500,00	2,76	2,79	2,85	1,22
2	500	173,7	993,1	319,40	491,50	500,00	2,72	2,77	2,86	1,70
3	500	175,2	995,8	320,60	494,10	500,00	2,75	2,79	2,85	1,18
Promedio							2,74	2,78	2,85	1,37

Fuente: Elaboración propia

3.5.1.3. Peso específico del agregado grueso (gravilla y grava)

Figura 3.9. Secado superficial de la muestra saturada 24 hrs. antes y obtención del peso sumergido



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica:

a) Peso específico de la gravilla:

Tabla 3.15. Peso específico de la gravilla

Muestra N°	Peso muestra secada "a" (gr)	Peso muestra saturada con sup. Seca "b" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "c" (gr)	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. Seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	4925,30	5000,00	3216,00	2,76	2,80	2,88	1,52
2	4929,70	5000,00	3214,00	2,76	2,80	2,87	1,43
3	4932,20	5000,00	3218,00	2,77	2,81	2,88	1,37
Promedio				2,76	2,80	2,88	1,44

Fuente: Elaboración propia

b) Peso específico de la grava:

Tabla 3.16. Peso específico de la grava

Muestra n°	Peso muestra secada "a" (gr)	Peso muestra saturada con sup. Seca "b" (gr)	Peso muestra saturada dentro del agua "c" (gr)	Peso específico a granel (gr/cm ³)	Peso específico saturado con sup. Seca (gr/cm ³)	Peso específico aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	4908,60	5000,00	3209,00	2,74	2,79	2,89	1,86
2	4908,10	5000,00	3210,00	2,74	2,79	2,89	1,87
3	4909,30	5000,00	3207,00	2,74	2,79	2,88	1,85
Promedio				2,74	2,79	2,89	1,86

Fuente: Elaboración propia

3.5.1.4. Desgaste de los ángeles

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

Debido a las condiciones de esfuerzo deformación, la carga de la rueda es transmitida del pavimento a través de la llanta como una presión vertical aproximadamente uniforme y

alta. La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la subrasante.

Por esta razón los agregados que están en, o cerca de la superficie, como son los materiales de base y carpeta asfáltica, deben ser los más resistentes que los agregados usados en capas inferiores, como la sub base, de la estructura del pavimento, la razón se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito. Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El ensayo de desgaste de los ángeles, ASTM C-131 (para agregados menores de 1 ½”), mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o abrasión.

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

Figura 3.10. Colocado de la muestra en la máquina de los ángeles y obtención de muestra post rodillo giratorio



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica:

a) Desgaste de los Ángeles de la gravilla

Tabla 3.17. Especificaciones de desgaste de los ángeles. Gradación “C” para gravilla

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
Pasa	Retenido				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	Nº4			2500±10	
Nº4	Nº8				5000±10
PESO TOTAL		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Numero de esferas		12	11	8	6
Nº de revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación		15	15	15	15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.18. Resultados de desgaste de la gravilla

Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
C	5000	3495,5	30,09	35% máx.

Fuente: Elaboración propia

b) Desgaste de los Ángeles de la grava

Tabla 3.19. Especificaciones de desgaste de los ángeles. Gradación “B” para grava

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
Pasa	Retenido				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	Nº4			2500±10	
Nº4	Nº8				5000±10
Peso total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Numero de esferas		12	11	8	6
Nº de revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación		15	15	15	15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20. Resultados de desgaste de la grava

Gradación	Peso inicial	Peso final	% de desgaste	Especificación ASTM
B	5000	3635,7	27,29	35% máx.

Fuente: Elaboración propia

3.5.1.5. Equivalente de arena

Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz Nº 4 (4.75 mm). El término “Equivalente de arena” transmite el concepto que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezcla de partículas gruesas, arenas y generalmente finos.

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución en una probeta plástica graduada que luego de ser agitada separa el

recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un período de tiempo, se pueden leer las alturas de arcilla y arena en la probeta. El equivalente de arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje. Este método proporciona una manera rápida de campo para determinar cambios en la calidad de agregados durante la producción o colocación.

Figura 3.11. Colocado de la muestra con solución dentro de la probeta



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica:

Tabla 3.21. Resultados del equivalente de arena

N° de Muestra	H1	H2	Equivalente de Arena (%)
	(cm)	(cm)	
1	14,60	9,80	67,12
2	14,50	9,70	66,90
3	13,20	9,50	71,97
	Promedio		68,66

Fuente: Elaboración propia

3.5.1.6. Porcentaje de caras fracturadas

Resultados de la práctica:

a) Porcentaje de caras fracturadas de la gravilla

Tabla 3.22. Porcentaje de caras fracturadas de la gravilla

Ensayo	Lecturas	Promedio	Especificación	
Ensayo N°	1			
Peso total (grs.) (a)	1000			
Peso retenido tamiz N° 8 (grs.) (b)	789,5			
Caras no fracturadas (grs.) (a-b)	210,5			
% Caras Fracturadas = (b/a)*100	78,95	79,0	>	75

Fuente: Elaboración propia

b) Porcentaje de caras fracturadas de la grava

Tabla 3.23. Porcentaje de caras fracturadas de la grava

Ensayo	Lecturas	Promedio	Especificación	
Ensayo N°	1			
Peso total (grs.) (a)	1000			
Peso retenido tamiz N° 8 (grs.) (b)	783,9			
Caras no fracturadas (grs.) (a-b)	216,1			
% Caras Fracturadas = (b/a)*100	78,39	78,4	>	75

Fuente: Elaboración propia

3.5.1.6.1. Partículas largas y achatadas

Resultados de la práctica:

a) Partículas largas y achatadas de la gravilla

Tabla 3.24. Porcentaje de partículas largas y achatadas de la gravilla

Material	Peso retenido (gr)	Peso retenido partículas chatas alargadas (gr)	% retenido partículas chatas alargadas
3/8"	1000	42,2	4,22
(%) Total de Partículas Laminas (Máximo 10%)			4,22

Fuente: Elaboración propia

b) Partículas largas y achatadas de la grava

Tabla 3.25. Porcentaje de partículas largas y achatadas de la grava

Materia l	Peso retenido (gr)	Peso retenido partículas chatas alargadas (gr)	% retenido partículas chatas alargadas
3/4"	1000	61,8	6,18
(%) Total de Partículas Laminares (Máximo 10%)			6,18

Fuente: Elaboración propia

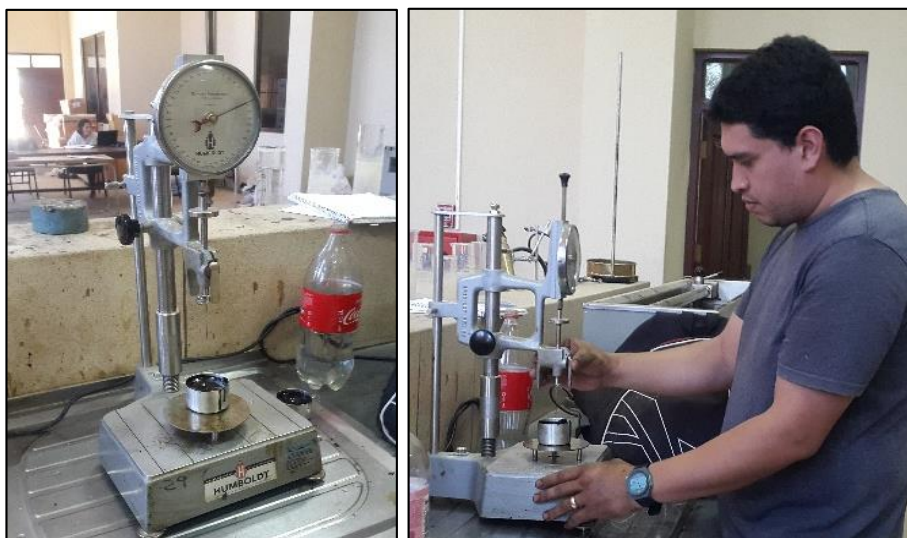
3.5.2. Caracterización de materiales bituminosos

3.5.2.1. Penetración

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

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

Figura 3.12. Realización del ensayo de penetración



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica:

Tabla 3.26. Resultados de penetración del cemento asfáltico

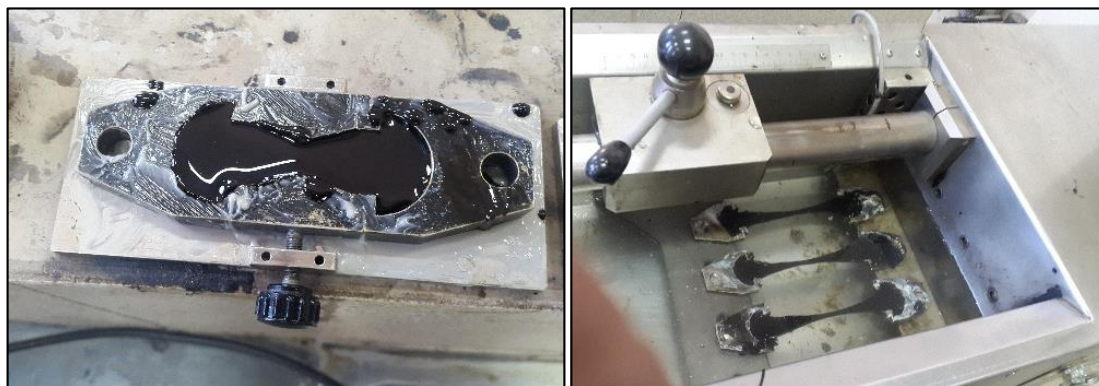
Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.:							
Lectura N°1	0,1 mm.	95	94	91			
Lectura N°2	0,1 mm.	93	90	89			
Lectura N°3	0,1 mm.	91	88	87			
Penetración Promedio	0,1 mm.	93	91	89	91	85	100

Fuente: Elaboración propia

3.5.2.2. Ductilidad

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

Figura 3.13. Realización del ensayo de ductilidad



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica:

Tabla 3.27. Resultados de ductilidad del cemento asfáltico.

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C AASHTO T-51	cm.	119	106	113	113	100	-

Fuente: Elaboración propia

3.5.2.3. Punto de inflamación

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

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

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

Figura 3.14. Muestra en la copa de Cleveland



Fuente: Elaboración propia

Resultados de la práctica:

Tabla 3.28. Resultados de punto de inflamación del cemento asfáltico

Ensayo	Unidad	Muestra			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	279	295	280	285	232	-

Fuente: Elaboración propia

3.5.2.4. Punto de ablandamiento

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

Dos discos horizontales de betún, fundidos en anillos de latón de apoyo, están acalorando a una proporción controlada en un baño líquido mientras soportan una esfera de acero. El punto de ablandamiento se informa como las pobres de las temperaturas a las cuales los dos discos se ablandan suficiente para permitir cada esfera, envolvió en betún, se caiga una distancia de 25 mm (1,0 in.).

Resultados de la práctica:

Tabla 3.29. Resultados de punto de ablandamiento del cemento asfáltico

Ensayo	Unid	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento	°C	49,0	48,0	49,5	49	41	53

Fuente: Elaboración propia

3.5.2.5. Peso específico

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

Resultados de la práctica:

Tabla 3.30. Resultados de peso específico del cemento asfáltico

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mín	Máx
Peso Específico a 25°C:							
Peso Picnómetro	grs.	36,8	35,1	33,7			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	88,3	84,9	85,1			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	64,5	61,9	61,8			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	88,9	85,6	85,5			
Peso Específico Promedio	grs./cm³	1,019	1,024	1,011	1,018	1	1,05

Fuente: Elaboración propia

3.5.2.6. Viscosidad

La viscosidad de un material bituminoso puede determinarse de muchas formas, dinámicas y cinemáticas, dependiendo del tipo de ligante se aplica la temperatura de ensayos, para el caso de cementos asfálticos, la viscosidad Saybolt se realiza a 135°C, y dependiendo del viscosímetro se obtiene la unidad del resultado.

Resultados de la práctica:

Tabla 3.31. Resultados de la viscosidad del cemento asfáltico

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mín	Máx
Viscosidad Saybolt Furol a 135°C	sSF	233	247	236	240	100	400

Fuente: Elaboración propia

3.6.Diseño granulométrico de las mezclas

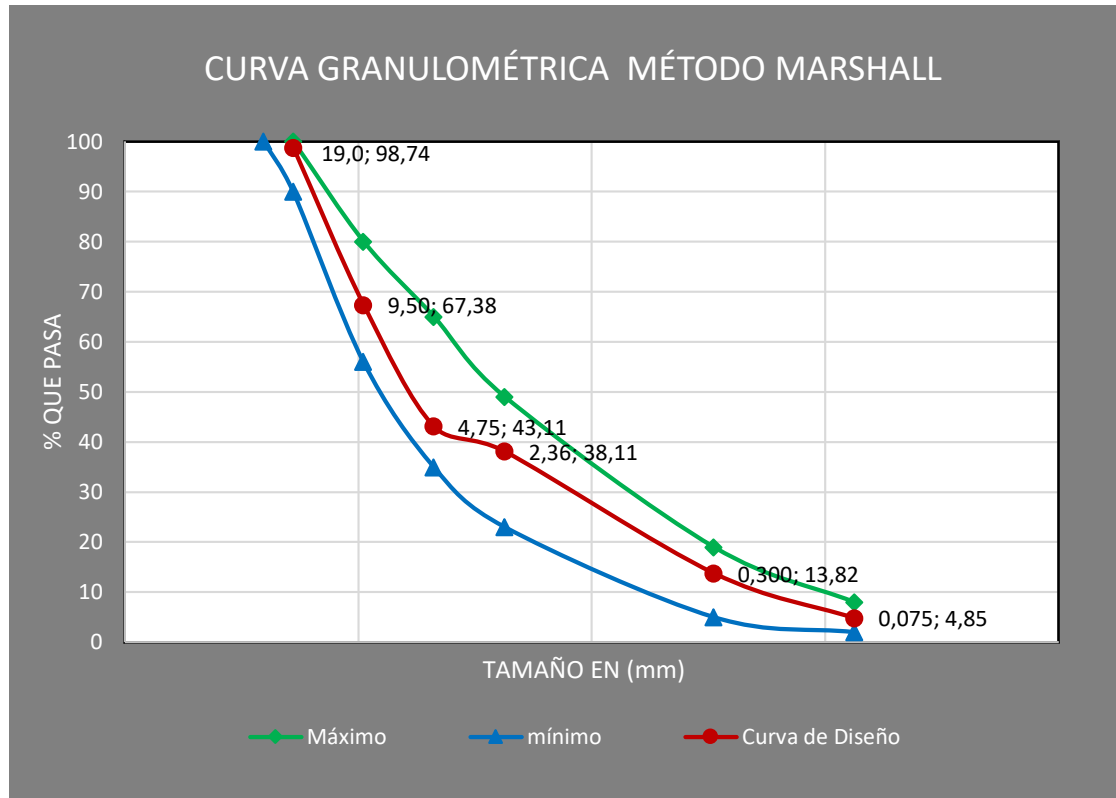
El diseño de mezclas por el método Marshall requiere de ciertos requisitos en la gradación de los agregados, como muestra el capítulo II, a partir de esas especificaciones se juega con los porcentajes de grava, gravilla y arena, hasta entrar en medio de las curvas mínimas y máximas normadas por Marshall, y el resultado fue el siguiente:

Tabla 3.32. Diseño granulométrico Método Marshall. Norma ASTM D3515

Tamices	Tamaño mm	Grava	Gravilla	Arena	Curva de dosificación				Especificaciones	
		(%) 25,00	(%) 32,00	(%) 43,00	Peso Ret.	Ret. Acum.	% Ret.	% que pasa del total	ASTM D3515 Mín. Máx.	
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,0	62,93	0,00	0,00	62,93	62,93	1,26	98,74	90	100
1/2"	12,5	861,15	10,62	0,00	871,77	934,70	18,69	81,31	-	-
3/8"	9,50	300,07	396,26	0,00	696,32	1631,02	32,62	67,38	56	80
Nº4	4,75	25,45	1110,83	77,37	1213,65	2844,67	56,89	43,11	35	65
Nº8	2,36	0,41	82,29	167,16	249,86	3094,53	61,89	38,11	23	49
Nº16	1,18	0,00	0,00	216,88	216,88	3311,40	66,23	33,77	-	-
Nº30	0,60	0,00	0,00	637,09	637,09	3948,49	78,97	21,03	-	-
Nº50	0,30	0,00	0,00	360,66	360,66	4309,15	86,18	13,82	5	19
Nº100	0,15	0,00	0,00	241,59	241,59	4550,74	91,01	8,99	-	-
Nº200	0,075	0,00	0,00	206,66	206,66	4757,39	95,15	4,85	2	8
BASE	-	0,00	0,00	242,61	242,61	5000,00	100,00	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico 3.4. Curva de diseño granulométrico Método Marshall.
Norma ASTM D3515**



Fuente: Elaboración propia

3.6.1. Dosificación de agregados

Para que la curva anterior de diseño se encuentre aproximadamente en el medio de los valores mínimo y máximo, se tiene la siguiente dosificación.

Tabla 3.33. Dosificación de agregados de mezcla asfáltica con el Método Marshall.

Agregado	Valor	Unidad
Grava	25	%
Gravilla	32	%
Arena	43	%

Fuente: Elaboración propia

3.7.Diseño para mezclas asfálticas convencionales (sin aditivo)

El presente estudio utiliza el Método Marshall para el diseño de las mezclas asfálticas. La dosificación de agregados es aplicada en todo el estudio. Sin embargo, para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico se hace variar el ligante del 4.5% al 7%. Para cada porcentaje propuesto se hizo 3 briquetas, haciendo un total de 18 briquetas.

Por otra parte, la metodología de laboratorio para realizar las briquetas primero se hicieron briquetas con mezclas convencionales sin aditivo, a diferentes temperaturas de 80°C, 90°C, 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C y 160°C, cuyos resultados serán comparados con las propiedades de las mezclas usando el aditivo Zycotherm.

3.7.1. Dosificación según porcentajes de C.A.

A partir del diseño granulométrico se obtuvo la siguiente dosificación de cemento asfáltico y agregados. Esta dosificación será usada en todos los diseños de mezclas asfálticas propuestos a diferentes temperaturas de ensayo.

Tabla 3.34. Dosificación para determinar el contenido óptimo de C.A.

	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Porcentaje de Agregado (%)	95,50	95,00	94,50	94,00	93,50	93,00
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	54,00	60,00	66,00	72,00	78,00	84,00
Peso de Grava (gr) *	286,50	285,00	283,50	282,00	280,50	279,00
Peso de Gravilla (gr) *	366,72	364,80	362,88	360,96	359,04	357,12
Peso de Arena (gr) *	492,78	490,20	487,62	485,04	482,46	479,88
Peso total de la briketa (gr) *	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0

Fuente: Elaboración propia

(*) Valores para una briketa, que varían según los porcentajes de ligante asfáltico y agregado.

Figura 3.15. Elaboración de mezcla asfáltica aditivada según calculo



Fuente: Elaboración propia

3.7.2. Resultados de pruebas Marshall para mezclas convencionales sin aditivo

Después de obtener la dosificación y realizar las briquetas, éstas se someten a pruebas previas de densidad y relaciones volumétricas, luego durante la rotura a pruebas de estabilidad y fluencia por el método Marshall. Y los resultados obtenidos para cada temperatura son los siguientes:

Tabla 3.35. Valores de propiedades Marshall para mezclas convencionales a 80°C

Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4,5	2,406	1490,69	11,00	8,97	54,25	19,60
5,0	2,424	1848,58	10,00	7,43	61,58	19,33
5,5	2,430	2062,35	11,67	6,33	67,46	19,46
6,0	2,420	2080,33	13,00	5,86	70,88	20,13
6,5	2,412	1896,52	16,00	5,33	74,30	20,72
7,0	2,388	1673,93	18,33	5,38	75,32	21,80

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.36. Valores de propiedades Marshall para mezclas convencionales a 90°C

Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4,5	2,410	1619,30	12,33	8,83	54,69	19,48
5,0	2,425	1863,87	11,33	7,40	61,70	19,31
5,5	2,436	2081,65	12,67	6,14	68,20	19,29
6,0	2,437	2070,40	13,67	5,23	73,31	19,59
6,5	2,422	1912,97	16,33	4,94	75,80	20,40
7,0	2,387	1618,34	19,67	5,43	75,13	21,85

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.37. Valores de propiedades Marshall para mezclas convencionales a 100°C

Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4,5	2,415	1569,82	10,33	8,63	55,29	19,31
5,0	2,427	1937,00	10,33	7,33	61,91	19,25
5,5	2,429	2106,62	11,67	6,39	67,26	19,51
6,0	2,424	2082,34	14,00	5,71	71,43	20,00
6,5	2,411	1977,12	16,33	5,37	74,13	20,76
7,0	2,391	1721,90	18,67	5,28	75,67	21,72

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.38. Valores de propiedades Marshall para mezclas convencionales a 110°C

Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4,5	2,435	1638,99	11,67	7,88	57,72	18,64
5,0	2,443	1960,46	12,00	6,70	64,16	18,70
5,5	2,448	2031,33	12,67	5,66	70,03	18,89
6,0	2,442	2020,65	14,33	5,03	74,10	19,42
6,5	2,416	1849,96	18,00	5,14	75,01	20,57
7,0	2,394	1561,46	23,00	5,13	76,24	21,60

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.39. Valores de propiedades Marshall para mezclas convencionales a 120°C**

Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4,5	2,409	1668,30	12,67	8,86	54,59	19,51
5,0	2,417	1825,83	12,33	7,70	60,66	19,57
5,5	2,436	2058,36	13,33	6,12	68,24	19,28
6,0	2,431	2053,90	16,00	5,44	72,48	19,77
6,5	2,416	1869,54	19,67	5,16	74,94	20,58
7,0	2,400	1566,94	22,67	4,93	77,00	21,43

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.40. Valores de propiedades Marshall para mezclas convencionales a 130°C**

Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4,5	2,430	1657,79	12,67	8,05	57,15	18,80
5,0	2,451	1835,26	12,33	6,42	65,20	18,46
5,5	2,457	2050,48	13,33	5,33	71,36	18,60
6,0	2,457	2047,70	16,00	4,43	76,57	18,91
6,5	2,442	1876,56	19,67	4,15	78,98	19,74
7,0	2,427	1538,06	22,67	3,84	81,30	20,53

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.41. Valores de propiedades Marshall para mezclas convencionales a 140°C

Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4,5	2,441	1144,45	13,67	7,64	58,55	18,43
5,0	2,454	1751,82	11,67	6,30	65,66	18,35
5,5	2,465	2030,73	12,67	5,02	72,63	18,33
6,0	2,462	2095,58	15,67	4,23	77,43	18,74
6,5	2,454	1925,49	19,33	3,66	81,07	19,33
7,0	2,427	1549,35	22,67	3,83	81,34	20,52

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.42. Valores de propiedades Marshall para mezclas convencionales a 150°C**

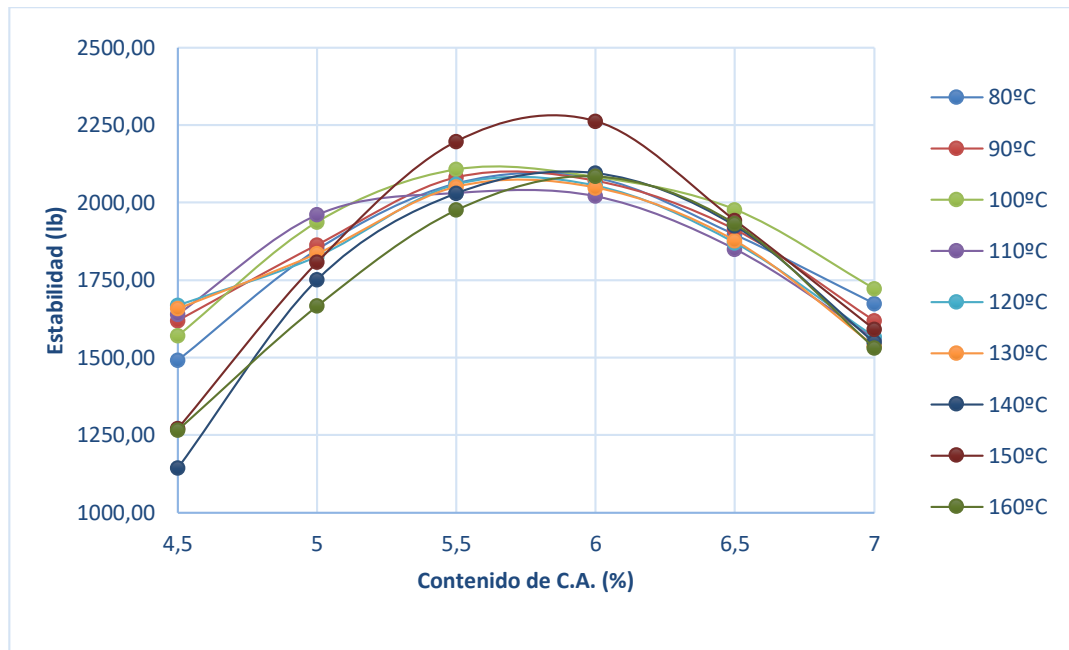
Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4,5	2,452	1272,02	10,67	7,22	60,01	18,06
5,0	2,468	1807,42	11,67	5,75	67,82	17,87
5,5	2,483	2197,09	13,00	4,32	75,65	17,73
6,0	2,482	2261,93	16,33	3,45	80,90	18,08
6,5	2,477	1942,35	19,33	2,77	85,11	18,58
7,0	2,452	1591,23	22,00	2,83	85,62	19,70

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.43. Valores de propiedades Marshall para mezclas convencionales a 160°C**

Porcentajes de cemento asfáltico	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
4,5	2,457	1266,01	13,33	7,02	60,74	17,88
5,0	2,478	1666,32	14,00	5,36	69,43	17,53
5,5	2,488	1976,35	15,33	4,13	76,49	17,57
6,0	2,489	2085,14	17,00	3,17	82,23	17,84
6,5	2,485	1931,72	20,00	2,45	86,65	18,31
7,0	2,470	1531,77	23,67	2,12	88,90	19,11

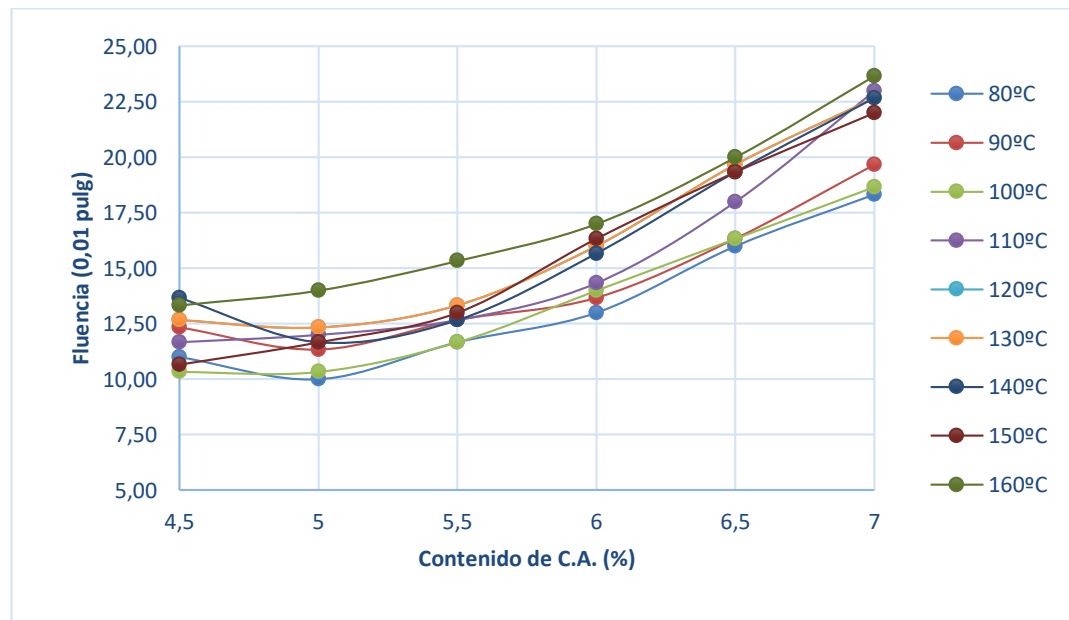
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.5. Curvas de estabilidad para mezclas convencionales a diferentes temperaturas.



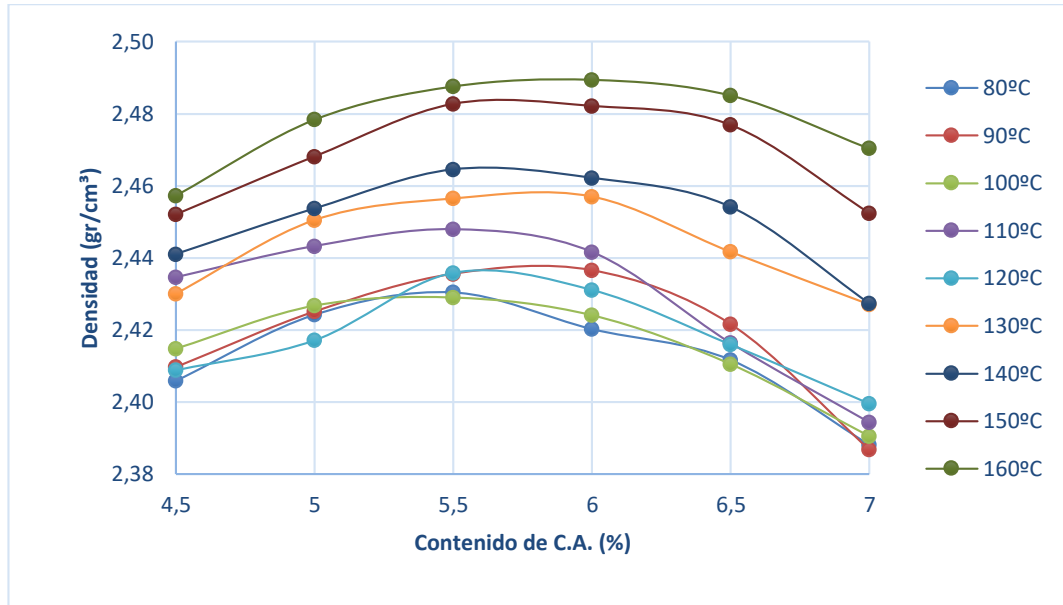
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.6. Curvas de fluencia para mezclas convencionales a diferentes temperaturas.



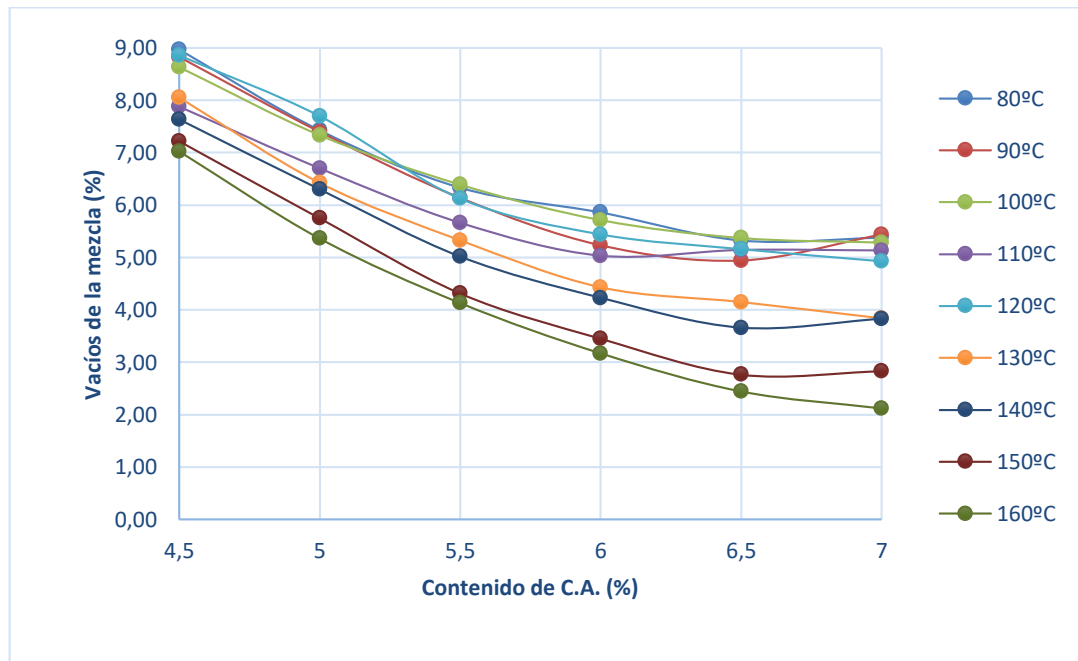
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.7. Curvas de densidad para mezclas convencionales a diferentes temperaturas.



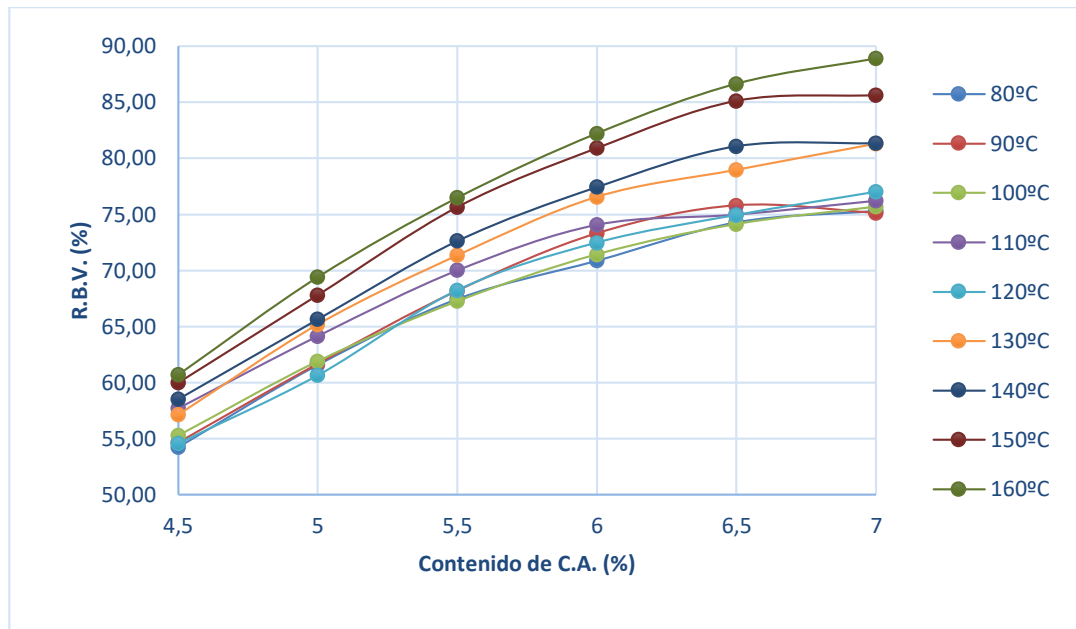
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.8. Curvas de vacíos de la mezcla para mezclas convencionales a diferentes temperaturas.



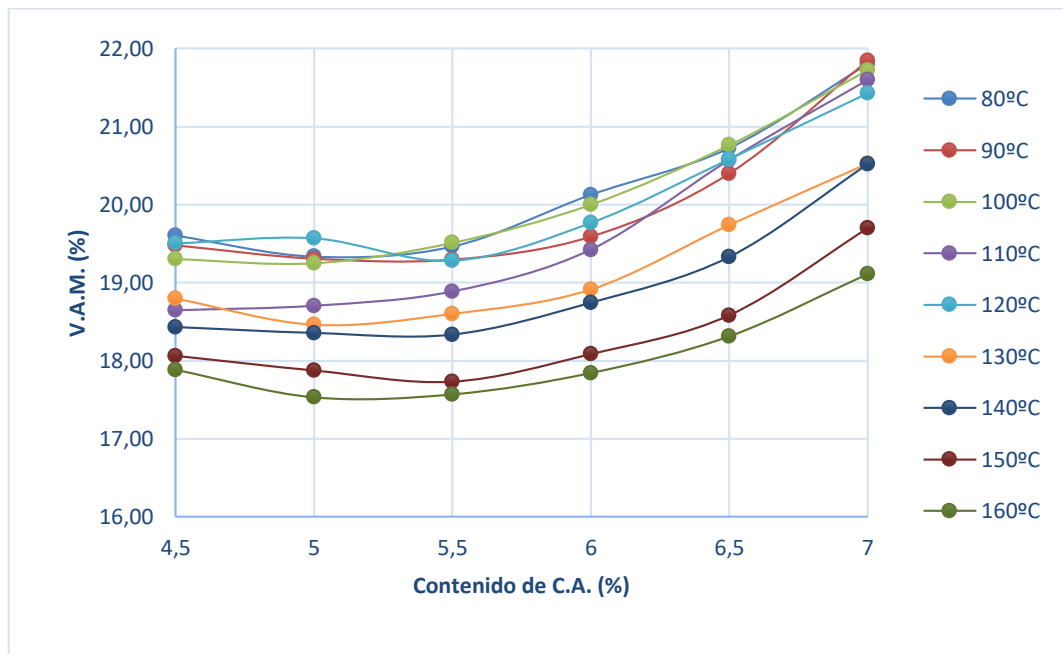
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.9. Curvas de R.B.V. para mezclas convencionales a diferentes temperaturas.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.10. Curvas de V.A.M. para mezclas convencionales a diferentes temperaturas.



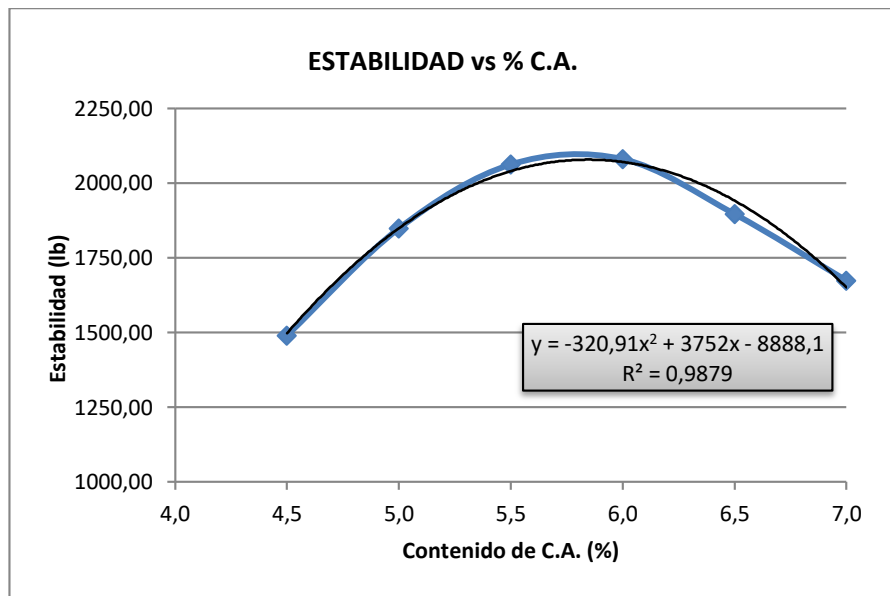
Fuente: Elaboración propia

3.7.3. Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico para mezclas convencionales a diferentes temperaturas

Para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico, se aplican los tres criterios mencionados anteriormente, como se detalla en el siguiente ejemplo con los resultados de la mezcla convencional a 80°C, a partir de tres propiedades Marshall, como se muestra a continuación:

a) Estabilidad máxima. – La curva de Estabilidad vs. Contenido de C.A. presenta la siguiente ecuación, de donde se obtiene el % de C.A. para una Estabilidad máxima.

Gráfico 3.11. Curva de estabilidad para una mezcla convencional a 80°C



Fuente: Elaboración propia

Ecuación:

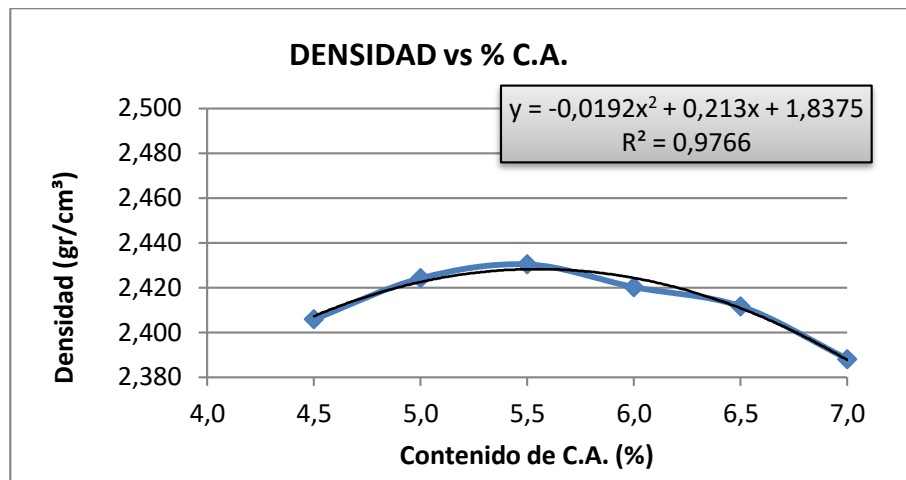
$$y = -320,91x^2 + 3752x - 8888,1$$

$$E_{\text{máx}} = 2078,76 \quad \text{Estabilidad máxima (lb).}$$

$$\text{Cont. C.A. } E_{\text{máx}} = 5,85 \quad \text{Contenido de ligante para la estabilidad máxima (\%)}$$

b) Densidad máxima. - La curva de Densidad vs. Contenido de C.A. presenta la siguiente ecuación, de donde se obtiene el % de C.A. para una densidad máxima.

Gráfico 3.12. Curva de densidad para una mezcla convencional a 80°C.



Fuente: Elaboración propia

Ecuación:

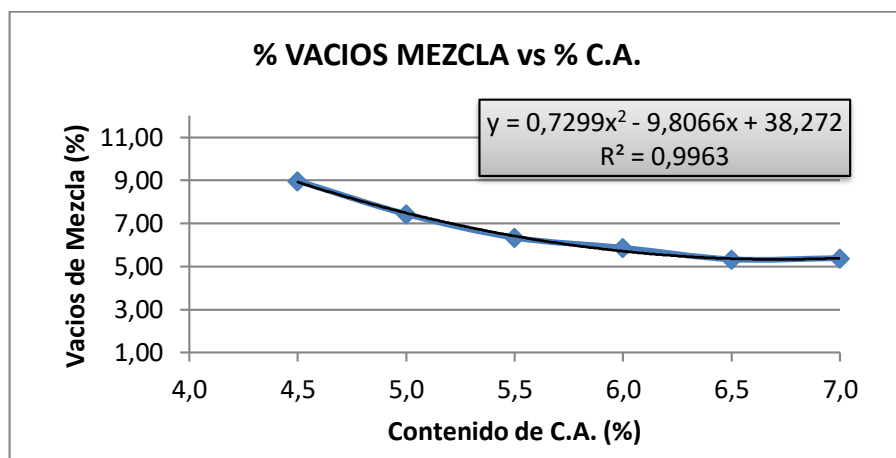
$$y = -0,0192x^2 + 0,213x + 1,8375$$

$$D_{\text{máx}} = 2,43 \quad \text{Densidad máxima (gr/cm}^3\text{)}.$$

$$\text{Cont. C.A. } D_{\text{máx}} = 5,55 \quad \text{Contenido de ligante para la densidad máxima (\%)}$$

c) Vacío de la mezcla igual al 4%. - La curva de % de Vacíos de la mezcla vs. Contenido de C.A. presenta la siguiente ecuación, de donde se obtiene el % de C.A. para un % de Vacíos de la mezcla igual a 4%.

Gráfico 3.13. Curva de vacíos para una mezcla convencional a 80°C.



Fuente: Elaboración propia

Ecuación:

$$y = 0,7299x^2 - 9,8066x + 38,272$$

% Vacíos = 5,27 Vacíos de la mezcla mín. dentro de la norma (%).

Cont. C.A. mín. = 6,28 Contenido de ligante para el mín. % de vacíos (%).

De los tres valores de Contenido de C.A. se saca un promedio y se obtiene el contenido óptimo de Cemento Asfáltico, como se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla 3.44. Contenido óptimo de C.A. para la mezcla convencional a 80°C.

Ensayo	Valor de Diseño	C.A. (%)
Estabilidad Marshall (Lb)	2078,76	5,85
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,43	5,55
Vacíos de la mezcla (%)	5,27	6,28
Contenido óptimo de C.A. (%)	Promedio =	5,89

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.45. Contenido óptimo de C.A. para la mezcla convencional a 90°C.

Ensayo	Valor de Diseño	C.A. (%)
Estabilidad Marshall (Lb)	2079,44	5,76
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,44	5,61
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	6,11
Contenido óptimo de C.A. (%)	Promedio =	5,83

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.46. Contenido óptimo de C.A. para la mezcla convencional a 100°C.

Ensayo	Valor de Diseño	C.A. (%)
Estabilidad Marshall (Lb)	2120,69	5,83
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,43	5,44
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	6,06
Contenido óptimo de C.A. (%)	Promedio =	5,78

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.47. Contenido óptimo de C.A. para la mezcla convencional a 110°C.

Ensayo	Valor de Diseño	C.A. (%)
Estabilidad Marshall (Lb)	2054,55	5,68
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,45	5,32
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	6,25
Contenido óptimo de C.A. (%)	Promedio =	5,75

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.48. Contenido óptimo de C.A. para la mezcla convencional a 120°C.

Ensayo	Valor de Diseño	C.A. (%)
Estabilidad Marshall (Lb)	2050,18	5,70
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,46	5,70
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	6,00
Contenido óptimo de C.A. (%)	Promedio =	5,80

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.49. Contenido óptimo de C.A. para la mezcla convencional a 130°C.

Ensayo	Valor de Diseño	C.A. (%)
Estabilidad Marshall (Lb)	2050,18	5,70
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,46	5,71
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	6,10
Contenido óptimo de C.A. (%)	Promedio =	5,84

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.50. Contenido óptimo de C.A. para la mezcla convencional a 140°C.

Ensayo	Valor de Diseño	C.A. (%)
Estabilidad Marshall (Lb)	2110,65	5,91
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,47	5,66
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,93
Contenido óptimo de C.A. (%)	Promedio =	5,83

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.51. Contenido óptimo de C.A. para la mezcla convencional a 150°C

Ensayo	Valor de Diseño	C.A. (%)
Estabilidad Marshall (Lb)	2230,30	5,86
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,48	5,78
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,77
Contenido óptimo de C.A. (%)	Promedio =	5,81

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.52. Contenido óptimo de C.A. para la mezcla convencional a 160°C**

Ensayo	Valor de Diseño	C.A. (%)
Estabilidad Marshall (Lb)	2057,24	5,90
Densidad máxima (gr/cm ³)	2,49	5,91
Vacíos de la mezcla (%)	4,00	5,52
Contenido óptimo de C.A. (%)	Promedio =	5,78

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, los contenidos óptimos de las mezclas convencionales (sin aditivo) y para cada temperatura son:

Tabla 3.53. Contenidos óptimos de C.A. para las mezclas convencionales

Temperatura	% óptimo de C.A.
80°C	5,89
90°C	5,83
100°C	5,78
110°C	5,75
120°C	5,80
130°C	5,84
140°C	5,83
150°C	5,81
160°C	5,78

Fuente: Elaboración propia

3.8.Diseño de mezclas tibias con uso del aditivo Zycotherm

Para el diseño de mezclas en tibio se mantiene la dosificación de agregados (25% grava, 32% gravilla y 43% arena), y cada temperatura de ensayo mantiene su porcentaje óptimo de cemento asfáltico. Con estas constantes, se generan mezclas tibias que varían desde 100°C a 140°C, adicionando el aditivo Zycotherm. Pero como se pretende conocer el comportamiento de este aditivo a temperaturas mayores y menores al rango de temperaturas tibias, entonces se adicionan dos temperaturas bajo el rango (80°C y 90°C) y dos temperaturas superiores al rango (150°C y 160°C). Es decir, se estudia el comportamiento de esta mezcla con nueve temperaturas de ensayo: 80°C, 90°C, 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C y 160°C.

3.8.1. Dosificación de mezclas tibias con variación de Zycotherm

Para la dosificación en tibio, se incorpora el producto Zycotherm, que según recomendaciones del fabricante está entre 0.05% al 0.10 % de la cantidad total de cemento asfáltico que contenga la mezcla. Por eso se proponen los siguientes seis porcentajes: 0,05%, 0,06%, 0,07%, 0,08%, 0,09% y 0,10%. Luego para cada porcentaje propuesto se hizo 3 briquetas, haciendo un total de 18 briquetas para cada temperatura de ensayo.

Tabla 3.54. Dosificación para diferentes porcentajes de Zycotherm

Porcentajes de Zycotherm	0,05%	0,06%	0,07%	0,08%	0,09%	0,10%
Porcentaje de Cemento Asfáltico (%)	5,78	5,78	5,78	5,78	5,78	5,78
Porcentaje de Agregado (%)	94,22	94,22	94,22	94,22	94,22	94,22
Peso de ZYCOTHERM (gr)	0,035	0,042	0,049	0,055	0,062	0,069
Peso de Cemento Asfáltico (gr)	69,33	69,32	69,31	69,30	69,30	69,29
Peso de Grava (gr)	282,66	282,66	282,66	282,66	282,66	282,66
Peso de Gravilla (gr)	361,80	361,80	361,80	361,80	361,80	361,80
Peso de Arena (gr)	486,18	486,18	486,18	486,18	486,18	486,18
Peso total de la briqueta (gr)	1200,0	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

3.8.2. Resultados a pruebas Marshall para mezclas con Zycotherm

Con la anterior dosificación, se realiza briquetas a diferentes temperaturas de ensayo: 80°C, 90°C, 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C y 160°C. Para cada temperatura de ensayo, se obtiene una planilla Marshall, que permite determinar el contenido óptimo del aditivo Zycotherm.

A continuación, las planillas con los resultados de las propiedades Marshall de briquetas realizadas a diferentes de temperaturas de mezclado. El contenido de datos y resultados de las planillas para las demás temperaturas se verifica en anexos.

Tabla 3.55. Valores de propiedades Marshall para mezclas con Zycotherm a 80°C

Porcentajes de Zycotherm	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
0,05	2,437	1225,66	10,00	5,40	72,31	19,50
0,06	2,445	1659,32	10,33	5,08	73,59	19,23
0,07	2,454	1882,54	10,67	4,74	74,95	18,94
0,08	2,457	1956,40	11,00	4,63	75,44	18,84
0,09	2,450	1911,53	11,00	4,91	74,28	19,08
0,10	2,443	1704,05	11,33	5,17	73,22	19,30

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.56. Valores de propiedades Marshall para mezclas con Zycotherm a 90°C

Porcentajes de Zycotherm	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
0,05	2,461	1403,03	9,67	4,56	75,55	18,66
0,06	2,462	1718,09	10,00	4,52	75,71	18,63
0,07	2,464	1898,75	10,00	4,47	75,95	18,58
0,08	2,465	2020,29	10,33	4,44	76,09	18,55
0,09	2,465	2010,05	11,00	4,43	76,10	18,55
0,10	2,463	1942,91	12,00	4,49	75,85	18,60

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.57. Valores de propiedades Marshall para mezclas con Zycotherm a 100°C

Porcentajes de Zycotherm	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
0,05	2,489	1708,00	10,00	3,59	79,73	17,72
0,06	2,491	1894,20	10,67	3,51	80,11	17,65
0,07	2,492	2078,60	11,00	3,48	80,24	17,63
0,08	2,492	2175,98	11,67	3,45	80,38	17,60
0,09	2,492	2229,86	13,00	3,48	80,27	17,62
0,10	2,491	2109,53	14,33	3,52	80,08	17,66

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.58. Valores de propiedades Marshall para mezclas con Zycotherm a 110°C

Porcentajes de Zycotherm	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
0,05	2,492	1743,06	10,67	3,50	80,09	17,58
0,06	2,494	1994,05	10,67	3,46	80,30	17,54
0,07	2,495	2176,39	11,67	3,42	80,47	17,51
0,08	2,495	2280,24	12,33	3,42	80,48	17,51
0,09	2,494	2229,86	13,67	3,42	80,45	17,51
0,10	2,494	2057,80	15,33	3,43	80,43	17,52

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.59. Valores de propiedades Marshall para mezclas con Zycotherm a 120°C

Porcentajes de Zycotherm	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
0,05	2,492	1884,37	10,67	3,42	80,61	17,62
0,06	2,498	2118,82	11,00	3,21	81,57	17,44
0,07	2,501	2259,64	12,00	3,08	82,25	17,33
0,08	2,501	2326,48	13,00	3,06	82,31	17,32
0,09	2,500	2280,76	14,67	3,11	82,07	17,36
0,10	2,497	2132,41	16,00	3,23	81,50	17,46

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.60. Valores de propiedades Marshall para mezclas con Zycotherm a 130°C

Porcentajes de Zycotherm	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
0,05	2,496	2037,42	11,00	3,19	81,78	17,51
0,06	2,506	2296,68	11,33	2,80	83,71	17,18
0,07	2,508	2439,69	12,33	2,72	84,10	17,11
0,08	2,507	2424,10	14,00	2,76	83,88	17,15
0,09	2,498	2325,19	15,67	3,12	82,13	17,45
0,10	2,482	2145,36	18,00	3,73	79,24	17,97

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.61. Valores de propiedades Marshall para mezclas con Zycotherm a 140°C

Porcentajes de Zycotherm	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
0,05	2,506	2127,69	11,00	2,85	83,43	17,20
0,06	2,513	2336,66	11,00	2,56	84,92	16,95
0,07	2,515	2406,27	11,67	2,47	85,39	16,87
0,08	2,515	2453,02	13,00	2,48	85,34	16,88
0,09	2,511	2332,13	13,33	2,65	84,43	17,03
0,10	2,501	2154,90	14,67	3,04	82,50	17,36

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.62. Valores de propiedades Marshall para mezclas con Zycotherm a 150°C

Porcentajes de Zycotherm	Densidad promedio (gr/cm³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
0,05	2,505	2078,86	11,00	2,89	83,19	17,19
0,06	2,511	2307,09	11,00	2,67	84,31	17,00
0,07	2,513	2454,11	11,67	2,61	84,62	16,95
0,08	2,513	2445,65	13,00	2,62	84,57	16,96
0,09	2,509	2283,40	13,33	2,76	83,84	17,08
0,10	2,501	2064,01	14,67	3,06	82,35	17,33

Fuente: Elaboración propia

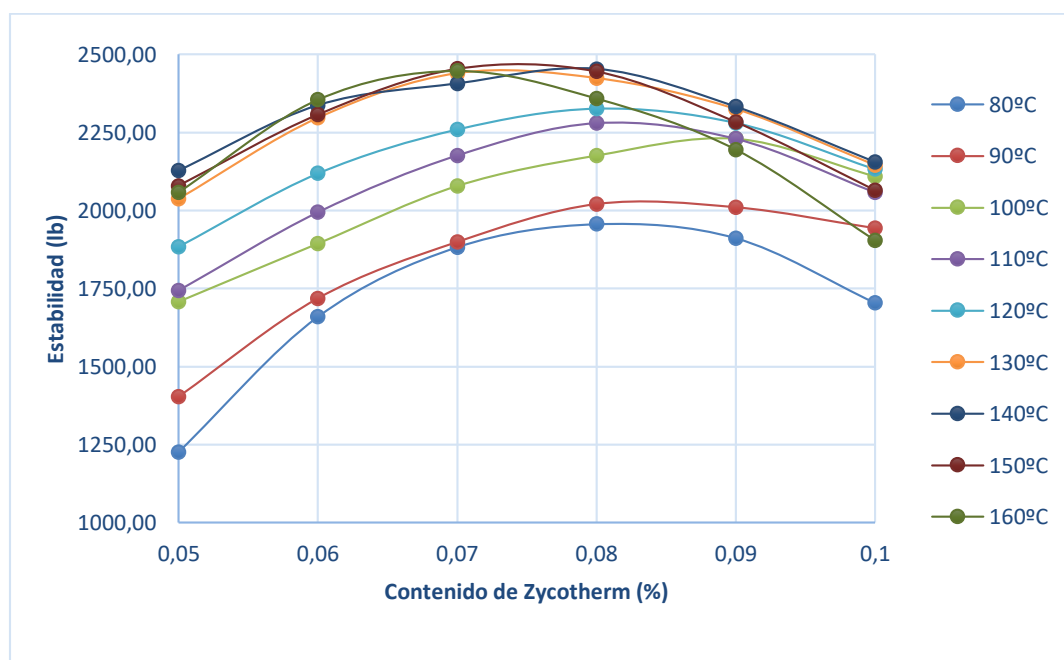
Tabla 3.63. Valores de propiedades Marshall para mezclas con Zycotherm a 160°C

Porcentajes de Zycotherm	Densidad promedio (gr/cm ³)	Estabilidad (libra)	Fluencia (pulg)	% de vacíos de mezcla total (%)	R.B.V. (relación betún vacíos) (%)	V.A.M. (vacíos de agregado mineral) (%)
0,05	2,509	2058,44	11,00	2,82	83,49	17,06
0,06	2,512	2354,69	11,00	2,69	84,12	16,95
0,07	2,514	2446,97	11,67	2,61	84,55	16,88
0,08	2,512	2358,81	13,00	2,69	84,11	16,96
0,09	2,509	2195,33	13,33	2,81	83,54	17,05
0,10	2,505	1904,67	14,67	2,94	82,85	17,17

Fuente: Elaboración propia

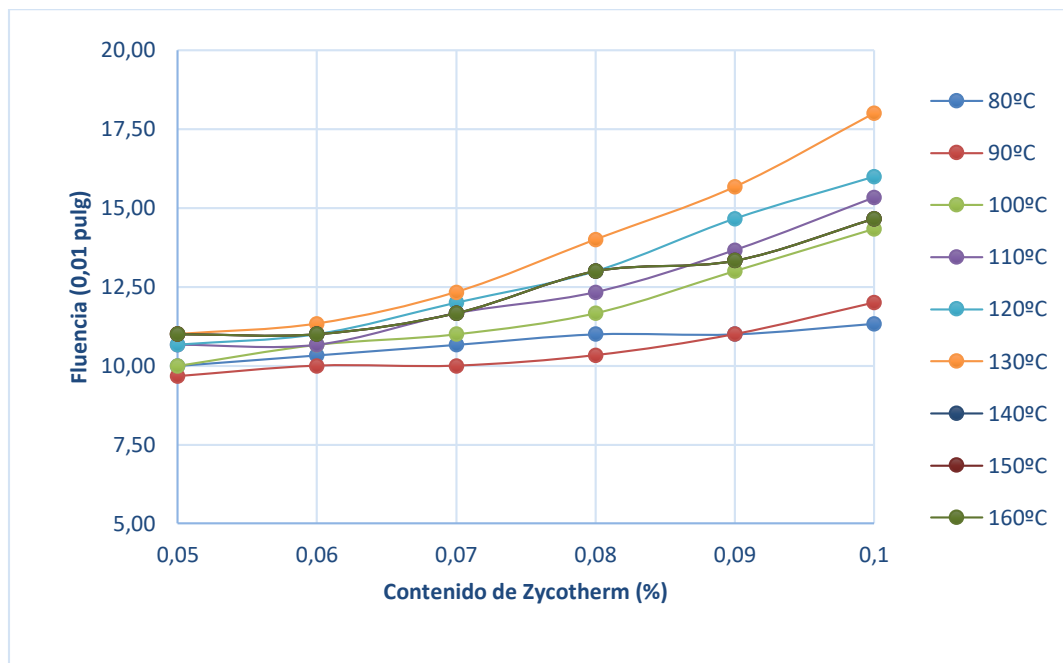
De las anteriores tablas, se obtienen las siguientes curvas de cada propiedad Marshall a diferentes temperaturas de mezclas con variación de Zycotherm:

Gráfico 3.14. Curvas de estabilidad para mezclas con Zycotherm a diferentes temperaturas.



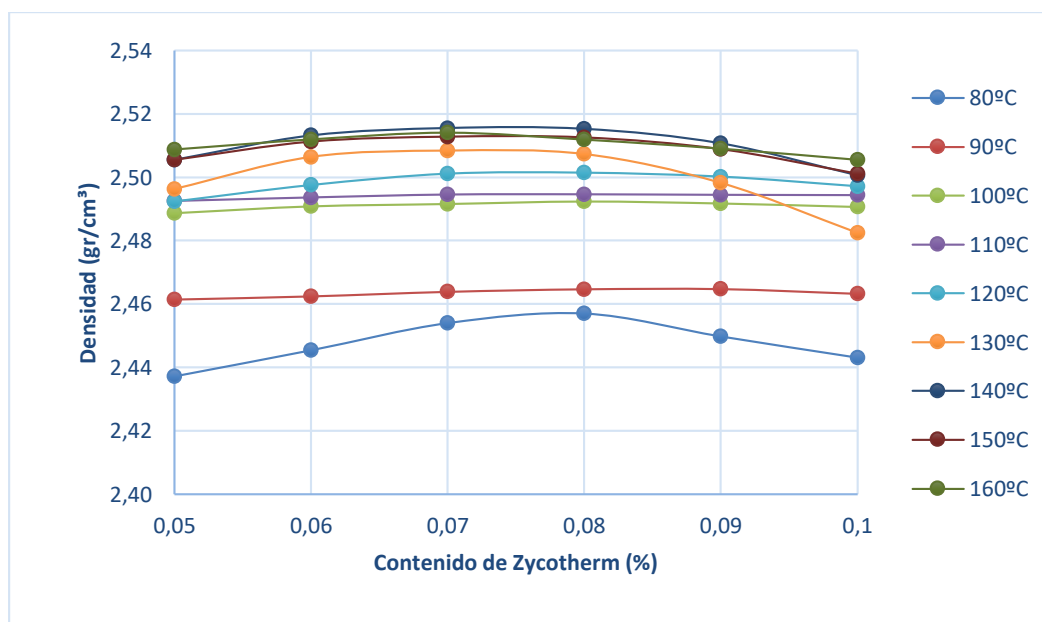
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.15. Curvas de fluencia para mezclas con Zycotherm a diferentes temperaturas.



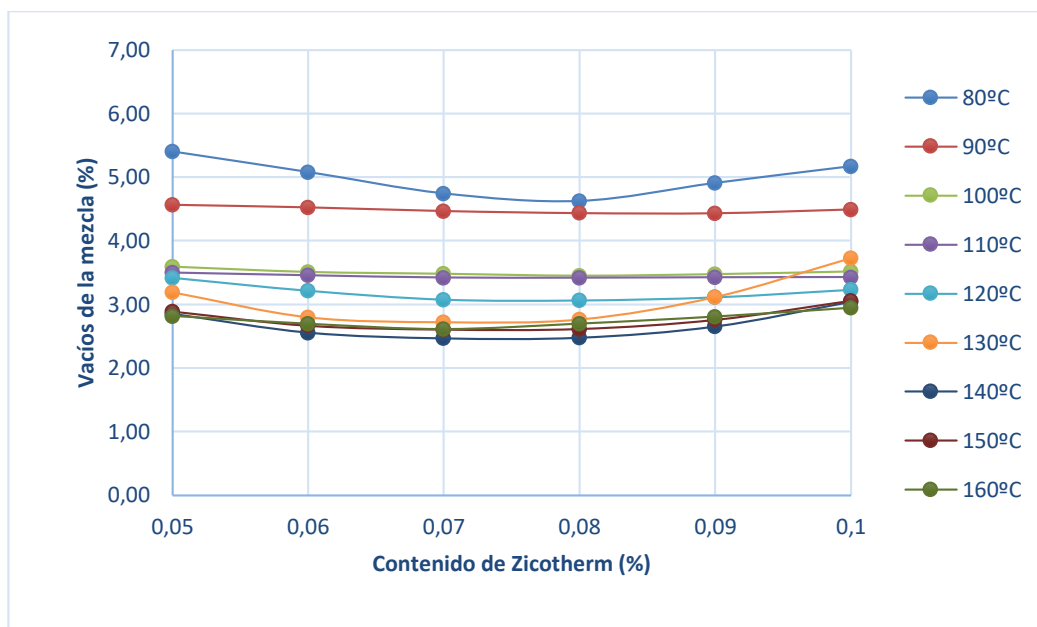
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.16. Curvas de densidad para mezclas con Zycotherm a diferentes temperaturas.



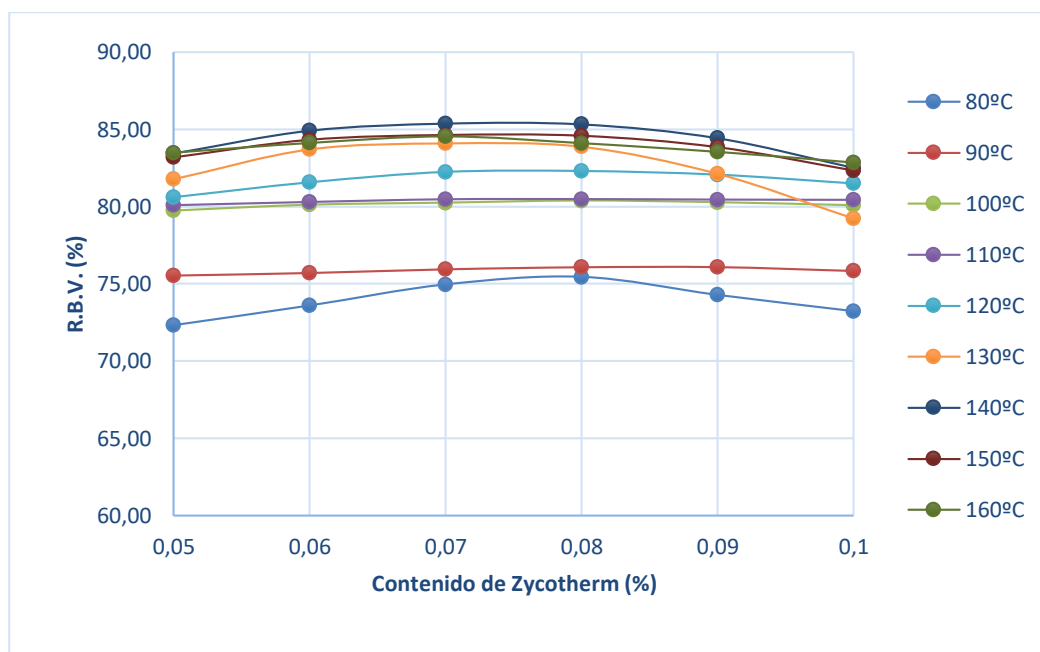
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.17. Curvas de vacíos de la mezcla para mezclas con Zycotherm a diferentes temperaturas.



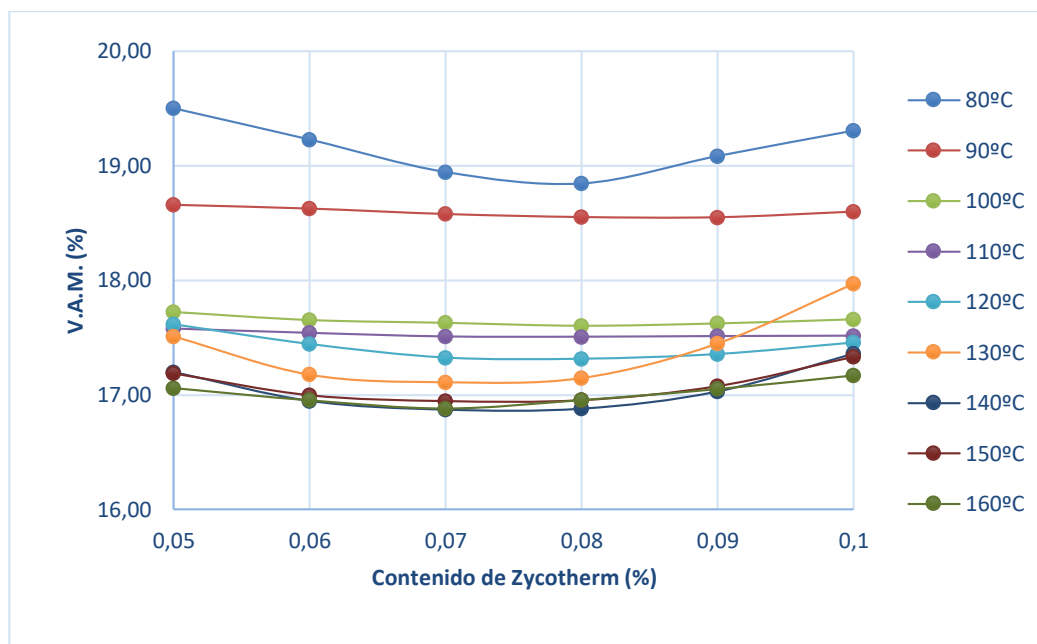
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.18. Curvas de R.B.V. para mezclas con Zycotherm a diferentes temperaturas.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.19. Curvas de V.A.M. para mezclas con Zycotherm a diferentes temperaturas.



Fuente: Elaboración propia

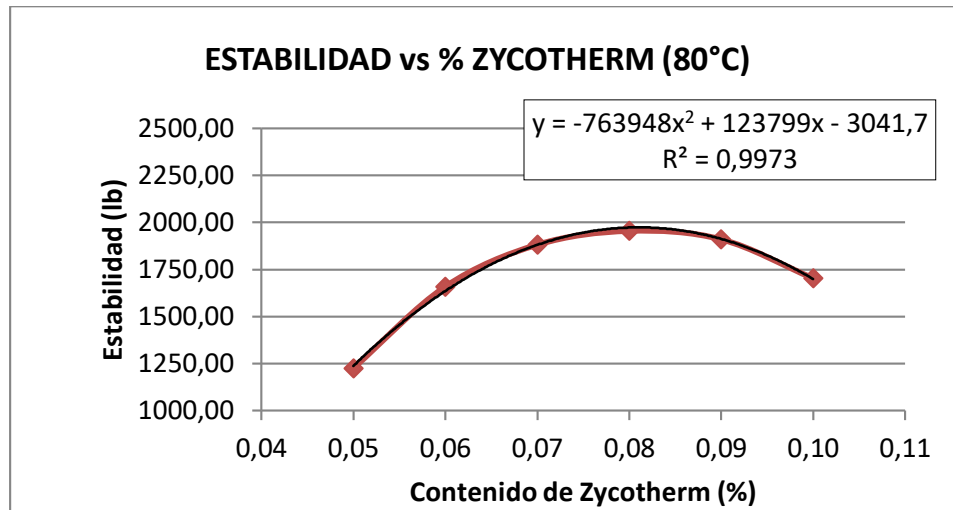
3.8.3. Determinación del contenido óptimo del aditivo Zycotherm a diferentes temperaturas.

Para determinar el contenido óptimo del aditivo Zycotherm para cada temperatura de ensayo 80°C, 90°C, 100°C, 110°C, 120°C, 130°C, 140°C, 150°C y 160°C, se aplican los criterios de estabilidad máxima y densidad máxima, no así el porcentaje de vacíos en la mezcla igual a 4, porque estos valores se mantienen casi constantes para todos los porcentajes de aditivo como se observa en el gráfico 3.17.

A continuación, se desarrolla un ejemplo para determinar el contenido óptimo de Zycotherm a la temperatura de 80°C:

a) Estabilidad máxima. – La curva de Estabilidad vs. Zycotherm presenta la siguiente ecuación, de donde se obtiene el % de Zycotherm para una Estabilidad máxima.

Gráfico 3.20. Curva de estabilidad vs. % Zycotherm a 80°C



Fuente: Elaboración propia

Ecuación:

$$y = -763948x^2 + 123799x - 3041,7$$

$$E_{\text{máx}} = 1973,76$$

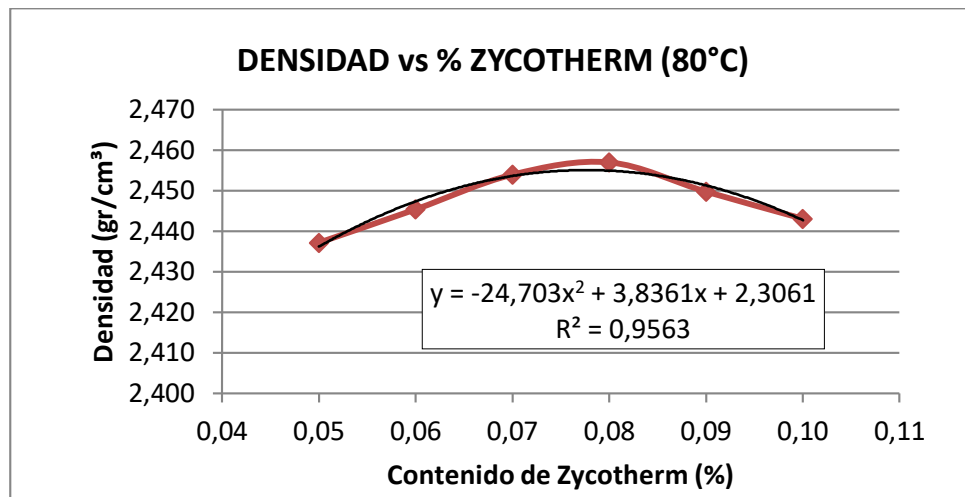
Estabilidad máxima (lb).

$$\text{Cont. Zycotherm } E_{\text{máx}} = 0,0810$$

Contenido de Zycotherm para la Estabilidad máxima (%).

b) Densidad máxima. - La curva de Densidad vs. Contenido de Zycotherm presenta la siguiente ecuación, de donde se obtiene el % de Zycotherm para una densidad máxima.

Gráfico 3.21. Curva de densidad vs. % Zycotherm a 80°C



Fuente: Elaboración propia

Ecuación: $y = -24,703x^2 + 3,8361x + 2,3061$

$D_{\text{máx}} = 2,455$ Densidad máxima (gr/cm³)

Cont. Zycoterm $D_{\text{máx}} = 0,0776$ Contenido de Zycoterm para la densidad máxima (%).

De los dos valores de contenido de Zycoterm se saca un promedio y se obtiene el contenido óptimo del aditivo Zycoterm, como se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla 3.64. Contenido óptimo de Zycoterm para mezclas a 80°C

Propiedad	Valor máximo según ecuación	% de Zycoterm	% Óptimo de Zycoterm a 80°C
Estabilidad Marshall (Lb)	1973,76	0,0810	0,0793
Densidad (gr/cm ³)	2,455	0,0776	

Fuente: Elaboración propia

Para las demás temperaturas se procede de la misma forma de cálculo (ver planillas en anexos) y se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3.65. Contenido óptimo de Zycoterm para mezclas a 90°C

Propiedad	Valor máximo según ecuación	% de Zycoterm	% Óptimo de Zycoterm a 90°C
Estabilidad Marshall (Lb)	2029,89	0,0861	0,0843
Densidad (gr/cm ³)	2,465	0,0825	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.66. Contenido óptimo de Zycotherm para mezclas a 100°C

Propiedad	Valor máximo según ecuación	% de Zycotherm	% Óptimo de Zycotherm a 100°C
Estabilidad Marshall (Lb)	2193,61	0,0871	0,0856
Densidad (gr/cm ³)	2,495	0,0841	

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.67. Contenido óptimo de Zycotherm para mezclas a 110°C**

Propiedad	Valor máximo según ecuación	% de Zycotherm	% Óptimo de Zycotherm a 110°C
Estabilidad Marshall (Lb)	2260,30	0,0813	0,0827
Densidad (gr/cm ³)	2,495	0,0841	

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.68. Contenido óptimo de Zycotherm para mezclas a 120°C**

Propiedad	Valor máximo según ecuación	% de Zycotherm	% Óptimo de Zycotherm a 120°C
Estabilidad Marshall (Lb)	2319,40	0,0804	0,0798
Densidad (gr/cm ³)	2,502	0,0793	

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.69. Contenido óptimo de Zycotherm para mezclas a 130°C**

Propiedad	Valor máximo según ecuación	% de Zycotherm	% Óptimo de Zycotherm a 130°C
Estabilidad Marshall (Lb)	2447,09	0,077	0,0749
Densidad (gr/cm ³)	2,51	0,073	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.70. Contenido óptimo de Zycotherm para mezclas a 140°C

Propiedad	Valor máximo según ecuación	% de Zycotherm	% Óptimo de Zycotherm a 140°C
Estabilidad Marshall (Lb)	2442,20	0,076	0,0741
Densidad (gr/cm ³)	2,52	0,073	

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.71. Contenido óptimo de Zycotherm para mezclas a 150°C**

Propiedad	Valor máximo según ecuación	% de Zycotherm	% Óptimo de Zycotherm a 150°C
Estabilidad Marshall (Lb)	2453,27	0,075	0,0735
Densidad (gr/cm ³)	2,51	0,072	

Fuente: Elaboración propia**Tabla 3.72. Contenido óptimo de Zycotherm para mezclas a 160°C**

Propiedad	Valor máximo según ecuación	% de Zycotherm	% Óptimo de Zycotherm a 160°C
Estabilidad Marshall (Lb)	2431,03	0,072	0,0716
Densidad (gr/cm ³)	2,51	0,071	

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, los contenidos óptimos de Zycotherm para cada temperatura se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.73. Contenidos óptimos de Zycotherm para las mezclas a diferentes temperaturas

Temperatura	% óptimo de Zycotherm
80°C	0,0793
90°C	0,0843
100°C	0,0856
110°C	0,0827
120°C	0,0798
130°C	0,0749
140°C	0,0741
150°C	0,0735
160°C	0,0716

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

COMPARACIÓN TÉCNICA DE LAS PROPIEDADES MARSHALL ENTRE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON Y SIN ADITIVO ZYCOTHERM

4.1.Introducción

En el presente capítulo se realiza una comparación técnica de las propiedades marshall entre mezclas con y sin aditivo Zycotherm a diferentes temperaturas semitibias, tibias y calientes, haciendo énfasis en las mezclas tibias.

4.2.Resumen de la caracterización de los agregados pétreos

Previo a una comparación técnica es necesario conocer los resultados previos de caracterización, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.1. Resumen de caracterización de agregados pétreos.

Ensayo	Agregado	Resultados										
Granulometría		Pasa tamiz (%)										
		1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16	Nº30	Nº50	Nº100	Nº200
	Grava	100,00	94,97	26,07	2,07	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Gravilla	100,00	100,00	99,34	74,57	5,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Arena	100,00	100,00	100,00	100,00	96,40	88,63	78,54	48,91	32,13	20,90	11,28
Peso específico	Grava	2,89 gr/cm ³										
	Gravilla	2,88 gr/cm ³										
	Arena	2,78 gr/cm ³										
Peso unitario	Grava	1,61 gr/cm ³										
	Gravilla	1,48 gr/cm ³										
	Arena	1,65 gr/cm ³										
Desgaste de los ángeles	Grava	27,29%										
	Gravilla	30,09%										
Caras fracturadas	Grava	78,39%										
	Gravilla	78,95%										
Partículas largas y achatadas	Grava	6,18%										
	Gravilla	4,22%										
Equivalente de arena	Arena	68,66%										

Fuente: Elaboración propia

4.3. Resumen de la caracterización del ligante asfáltico

Después de realizar la caracterización del cemento asfáltico 85/100, se tienen los siguientes resultados :

Tabla 4.2. Resumen de caracterización del cemento asfáltico.

Ensayo	Cemento asfáltico puro	Cemento asfáltico con óptimo Zycotherm
Penetración (0,1mm)	91	93
Peso específico (gr/cm ³)	1,018	1,010
Punto de inflamación (°C)	285	292
Punto de ablandamiento (°C)	49	48
Ductilidad (cm)	113	118
Viscosidad Sybolt (sSF)	241	193

Fuente: Elaboración propia

4.4. Análisis de resultados de las propiedades del método Marshall

A continuación, un resumen de los resultados óptimos de las propiedades Marshall para cada temperatura con y sin contenido de Zycotherm.

Tabla 4.3. Resumen de las propiedades técnicas Marshall de las mezclas sin Zycotherm a diferentes temperaturas

PROPIEDADES MARSHALL	MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS SIN ADITIVO									ESPECIFICACIONES AASHTO	
	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C	130°C	140°C	150°C	160°C	mínimo	máximo
Estabilidad sin aditivo (Lb)	2076,09	2078,15	2083,77	2050,89	2039,45	2021,46	2073,61	2195,30	2050,66	1800	-
Fluencia sin aditivo (0,01 pulg)	13,21	13,33	13,05	13,54	15,72	15,85	14,27	15,56	16,21	8	16
Densidad sin aditivo (gr/cm ³)	2,428	2,382	2,426	2,442	2,458	2,455	2,461	2,484	2,492	-	-
Vacíos mezcla sin aditivo (%)	5,79	5,36	6,11	5,29	5,77	4,89	4,23	3,72	3,54	3	5
V.A.M. sin aditivo (%)	19,74	19,47	19,69	19,27	19,63	18,72	18,79	17,98	17,67	13	-
R.B.V. sin aditivo (%)	71,46	72,55	70,03	73,56	73,84	77,16	78,22	80,05	79,94	75	82

Fuente: Elaboración propia

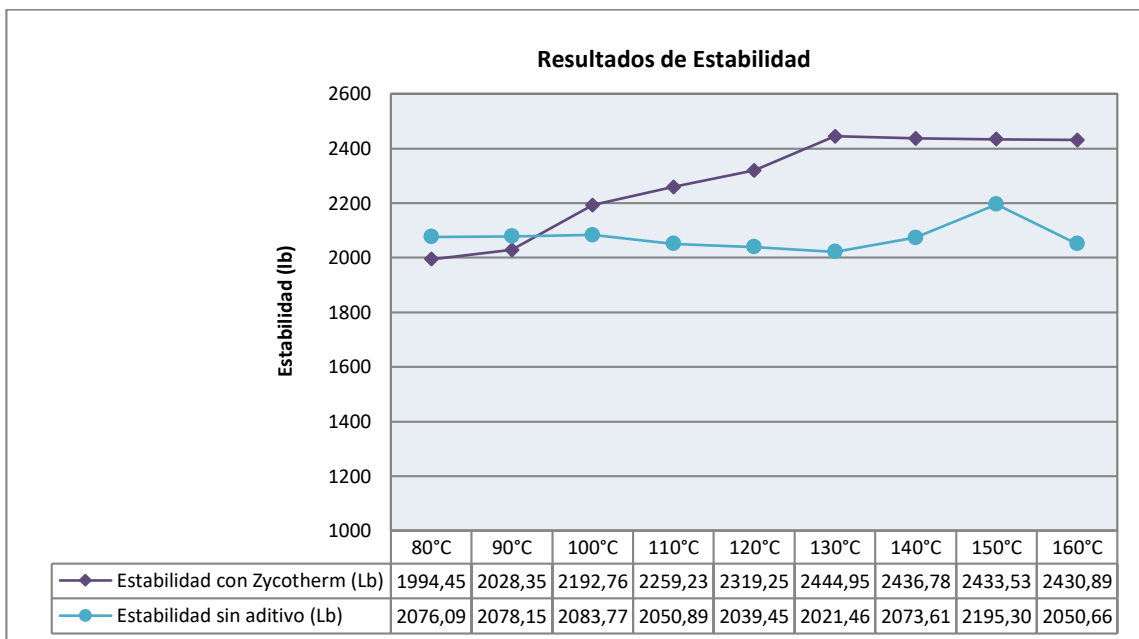
Tabla 4.4. Resumen de las propiedades técnicas Marshall de las mezclas con Zycotherm a diferentes temperaturas

PROPIEDADES MARSHALL	MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS CON ZYCOTHERM									ESPECIFICACIONES AASHTO	
	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C	130°C	140°C	150°C	160°C	mínimo	máximo
Estabilidad con Zycotherm (Lb)	1994,45	2028,35	2192,76	2259,23	2319,25	2444,95	2436,78	2433,53	2430,89	1800	-
Fluencia con Zycotherm (0,01 pulg)	11,306	10,68	12,43	12,71	13,06	13,05	12,55	12,05	11,96	8	16
Densidad con Zycotherm (gr/cm³)	2,450	2,465	2,492	2,495	2,502	2,508	2,511	2,512	2,510	-	-
Vacíos mezcla con Zycotherm (%)	4,83	4,53	3,46	3,36	3,09	2,82	2,79	2,77	2,78	3	5
V.A.M. con Zycotherm (%)	18,85	18,52	17,61	17,52	17,30	17,07	16,78	16,84	16,89	13	-
R.B.V. con Zycotherm (%)	74,67	75,54	80,33	80,83	82,12	83,45	85,15	85,27	84,63	75	82

Fuente: Elaboración propia

De las tabla 4.3 y 4.4, se observan la variación de resultados según las temperaturas de mezclado con y sin el aditivo Zycotherm, y se obtienen los siguientes gráficos:

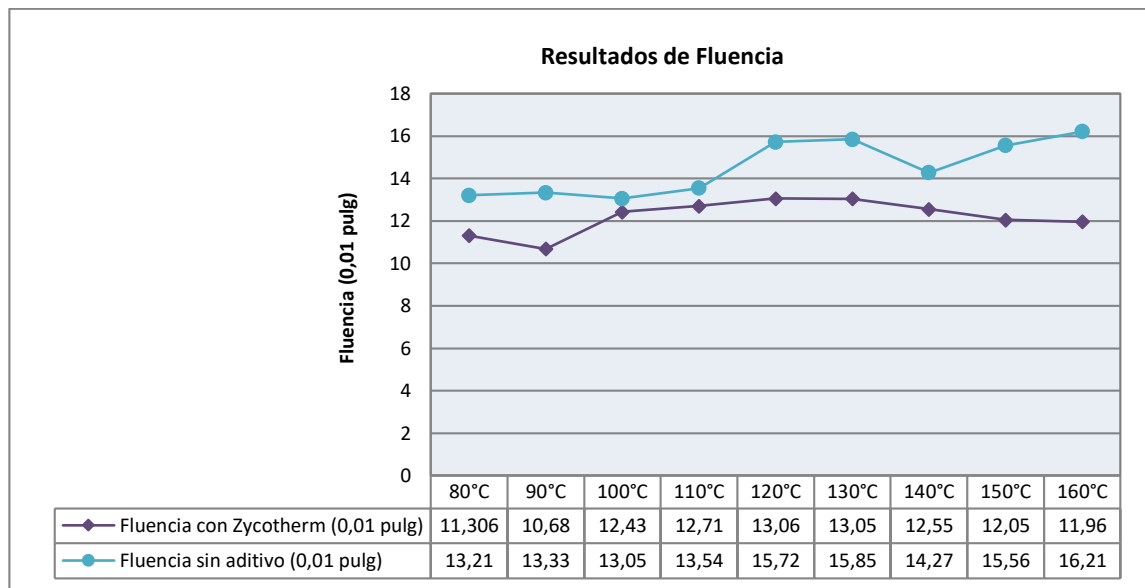
Gráfico 4.1. Variación de estabildades Marshall en estudio



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 4.1 se observa claramente que los valores de estabilidad aumentan a medida que se aumenta la temperatura de mezclado y comparando la mezcla convencional con las mezclas tibias con el aditivo Zycotherm, éstas últimas, aumentan considerablemente a 130°C, dando buenos resultados y superando lo especificado por la norma AASHTO. Según los resultados obtenidos para todas las temperaturas, todos los valores superan la estabilidad mínima de la norma porque son mayores a 1800 lb. Sin embargo las mezclas calientes tienen la tendencia de tener mayores resultados de la estabilidad que las mezclas tibias.

Gráfico 4.2. Variación de Fluencias Marshall en estudio

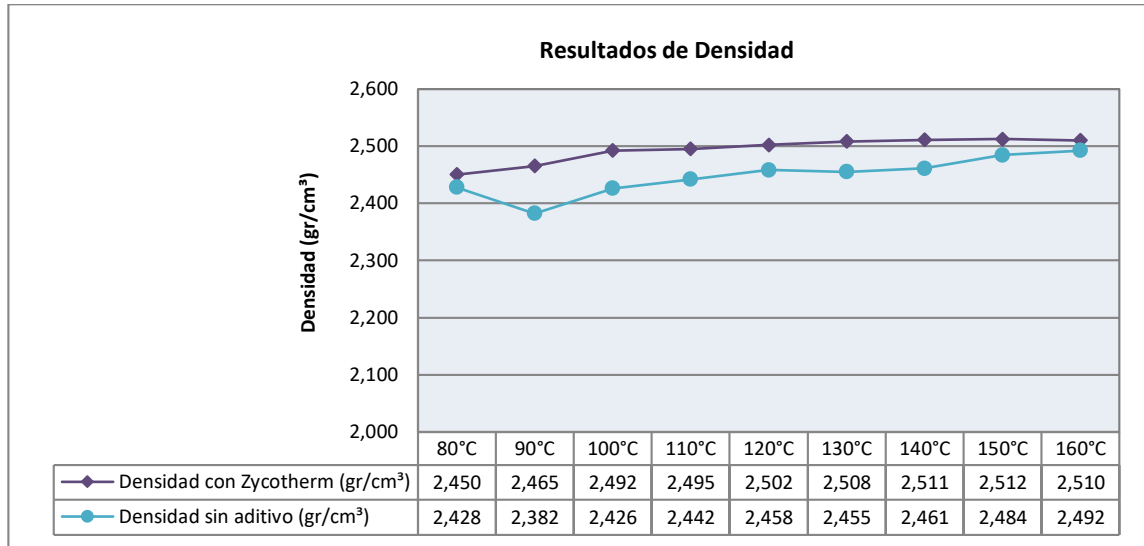


Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 4.2 se observa que una mezcla convencional genera una mayor fluencia respecto a las mezclas con Zycotherm, es decir una mezcla convencional. Sin embargo, los valores de fluencia con Zycotherm al ser menores igual se encuentran dentro del rango de la norma, por lo tanto es más eficiente.

Respecto a los resultados de fluencia, todos se encuentran dentro de la norma de 8lb a 16 lb. Sin embargo las mezclas en caliente tienen la tendencia de tener mayor deformación por fluencia que las mezclas tibias.

Gráfico 4.3. Variación de Densidades Marshall en estudio

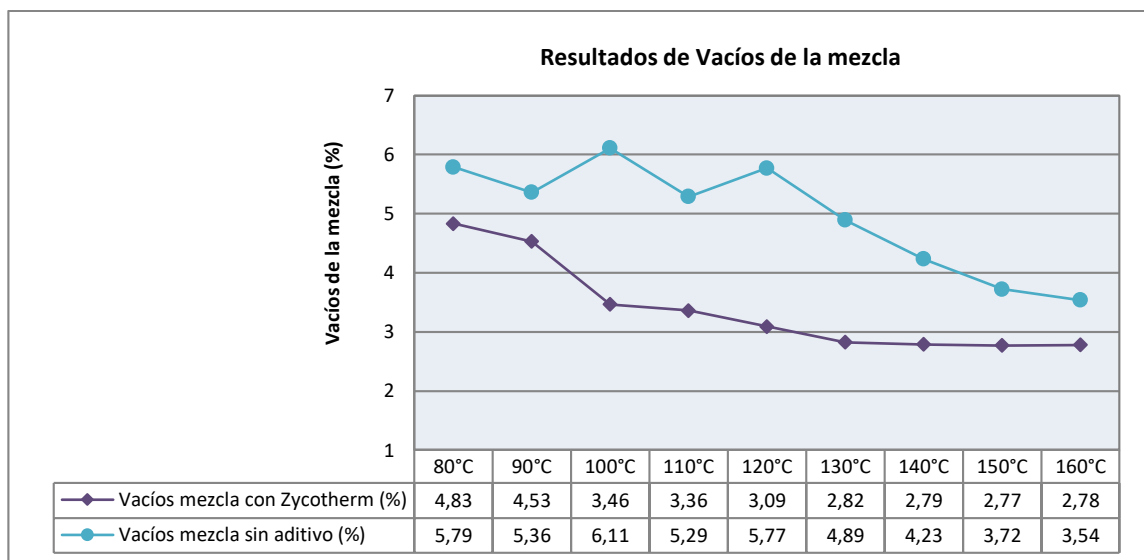


Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 4.3 se observa que la densidad de la mezcla con Zycotherm aumenta con la temperatura de mezclado, sobrepasando a la mezcla convencional, por lo tanto tiene un comportamiento poco creciente.

No existe una norma clara que defina la densidad mínima, pero entre las mezclas tibias y calientes, tienen la tendencia de ser similares, manteniéndose constante.

Gráfico 4.4. Variación de Vacíos en la mezcla Marshall en estudio

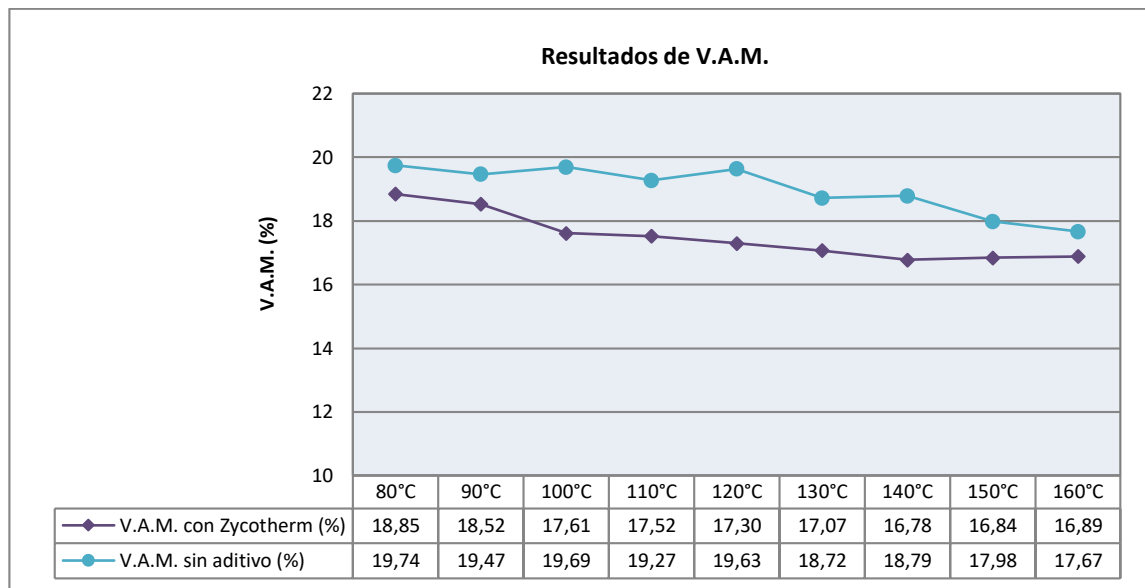


Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 4.4 se observa que los vacíos de la mezcla reducen a medida que aumenta la temperatura de mezclado, sin embargo, a partir de la mezcla convencional genera mayor cantidad de vacíos respecto a la mezcla con Zycotherm.

Los vacíos de la mezcla son menores para las mezclas frías y las mezclas tibias tienen mayor porcentaje de vacíos, sin embargo los resultados con Zycotherm en mezclas calientes no cumplen la norma porque se encuentran menor a 3% para mezclas densas. Y los resultados sin Zycotherm en mezclas tibias y semitibias no cumplen la norma porque se encuentran mayor a 5% para mezclas densas.

Gráfico 4.5. Variación de V.A.M. Marshall en estudio

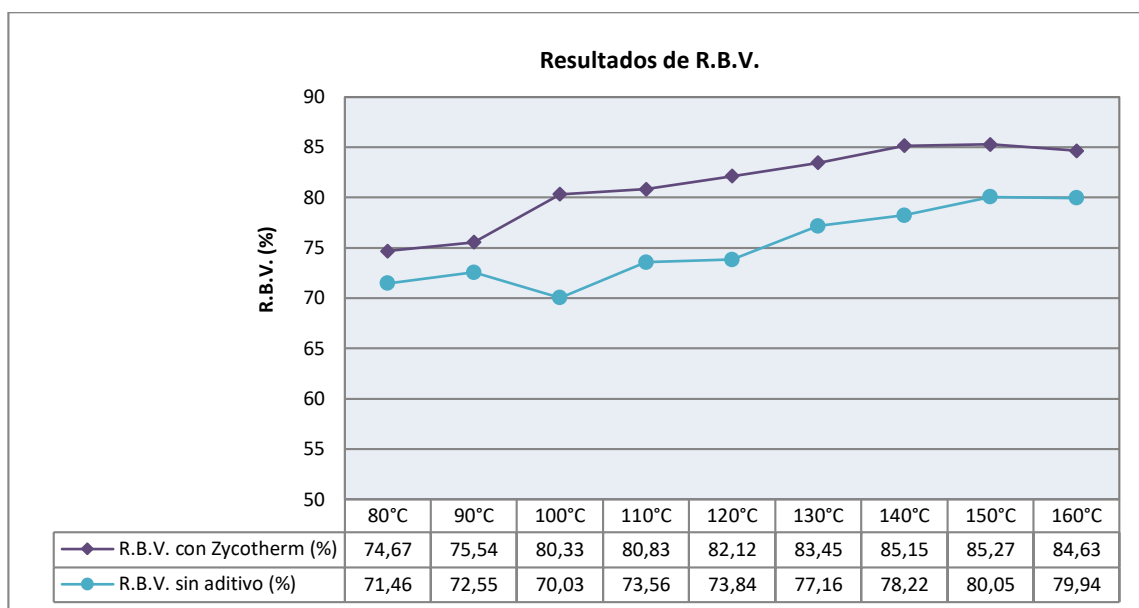


Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 4.5 se observa que el porcentaje de los Vacíos del Agregado Mineral (V.A.M.) disminuye según aumenta la temperatura de mezclado, sin embargo la mezcla convencional tiene mayor vacíos del agregado mineral que la mezcla con Zycotherm, es decir que el uso de este aditivo disminuye los vacíos por su alto grado de adherencia entre agregado y cemento asfáltico.

Según la norma todos los resultados son aceptables porque superan el 13% de V.A.M. y los resultados de las mezclas calientes son un poco menor que las mezclas tibias.

Gráfico 4.6. Variación de R.B.V. Marshall en estudio



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 4.6 se observa que la Relación Betún Vacíos (R.B.V.) aumenta a medida que aumenta la temperatura de mezclado, sobrepasando el límite superior de especificaciones de la norma AASHTO, pero la mezcla con Zycotherm, hasta la temperatura de 120°C cumple con el rango de la norma de 75% a 82%. Sin embargo se observa un leve ascenso en los resultados de las mezclas en caliente.

4.5.Determinación del contenido final del aditivo Zycotherm y la temperatura de mezclado.

Para determinar la temperatura óptima de mezclado para mezclas tibias haciendo uso del aditivo Zycotherm, se tomarán en cuenta los valores de la tabla 4.5.

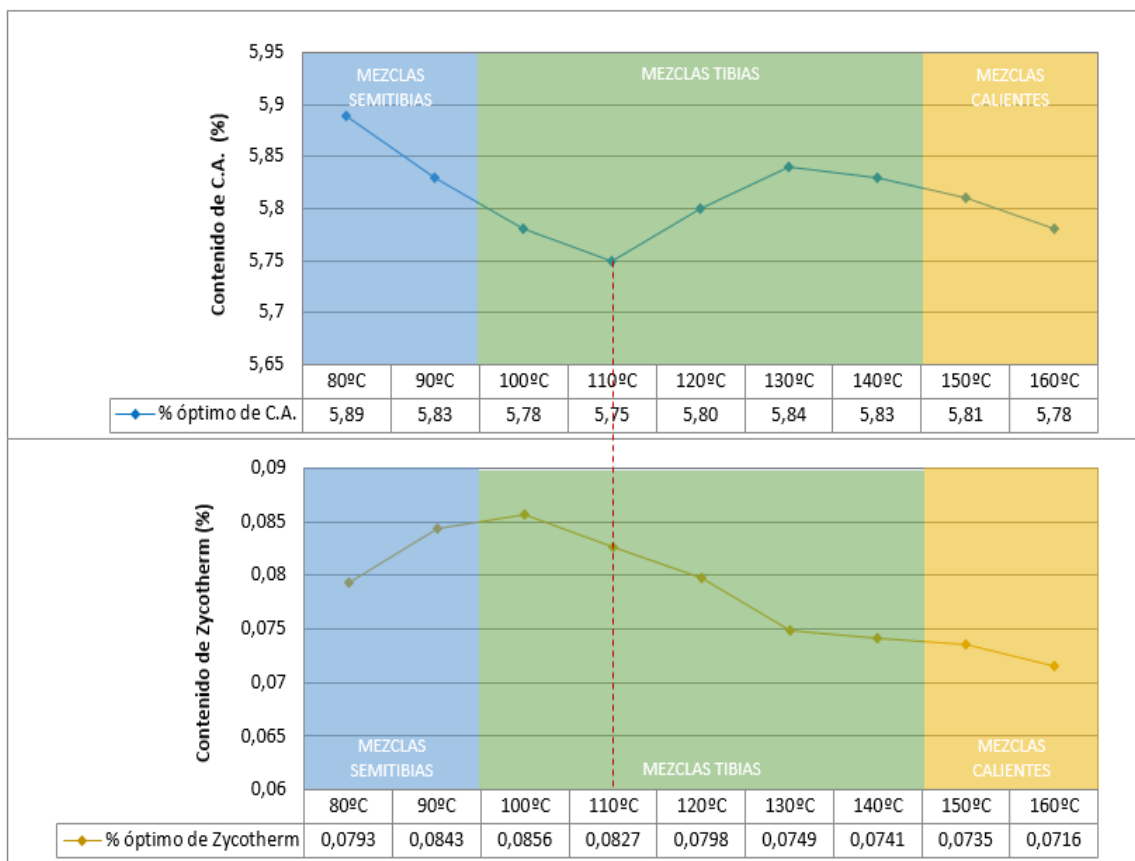
Si graficamos el comportamiento del contenido de cemento asfáltico y el contenido de Zycotherm para cada temperatura de mezclado, entonces se logra determinar el contenido la contenido óptimo de cemento asfáltico, el contenido óptimo de Zycotherm y su temperatura de mezclado como se observa en el gráfico 4.7.

Tabla 4.5. Resultados finales de contenidos óptimos de C.A. y Zycotherm para cada tipo de mezcla

Tipo de mezcla	Temperatura	% óptimo de C.A.	% óptimo de Zycotherm
Semitibia	80°C	5,89	0,0793
	90°C	5,83	0,0843
Tibia	100°C	5,78	0,0856
	110°C	5,75	0,0827
	120°C	5,80	0,0798
	130°C	5,84	0,0749
	140°C	5,83	0,0741
Caliente	150°C	5,81	0,0735
	160°C	5,78	0,0716

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.7. Curvas para determinar el contenido final de cemento asfáltico, Zycotherm y temperatura de mezclado.



Fuente: Elaboración propia

Del gráfico 4.7, se parte del contenido de cemento asfáltico más bajo, para garantizar el bajo costo, sin perder calidad de resultados, logrando obtener el 5,75% de contenido de cemento asfáltico, luego se traza un línea vertical y se encuentra el contenido óptimo recomendado de Zycotherm igual al 0,0827% del contenido de cemento asfáltico, con su respectiva temperatura de compactado recomendado a 110°C.

Tabla 4.6. Resultados finales

Parámetro	Resultado final
Contenido final de cemento asfáltico	5,75%
Contenido final de Zycotherm	0,083%
Temperatura de mezclado	110°C

Fuente: Elaboración propia

4.6.Aplicación final

Para hacer un análisis estadístico, se procedió a realizar 30 muestras con los siguientes valores finales:

Tabla 4.7. Valores finales para el uso de Zycotherm

Material	Cantidad
Contenido de grava	25 %
Contenido de gravilla	32 %
Contenido de arena	43 %
Contenido óptimo de Cemento Asfáltico	5,75 %
Temperatura de mezclado	110 °C
Contenido óptimo de Zycotherm	0,083 %

Fuente: Elaboración propia

Las 30 briquetas realizadas, generaron los siguientes resultados:

Tabla 4.8. Datos y cálculos de estabilidad y fluencia para estadística

N° de probeta	% Zycotherm	% de Asfalto		altura de probeta	Estabilidad				Fluencia
		base Mezcla	base Agregados		lectura del dial	carga	factor de correccion de altura de probeta	Estabilidad real corregida	lectura dial del flujo
		%	%		mm	libras	-	libras	0,01 "
1	0,083	5,75	6,10	7,05	978	2615,34	0,85	2234,54	10
2	0,083	5,75	6,10	7,08	906	2421,46	0,84	2037,17	12
3	0,083	5,75	6,10	7,10	894	2389,14	0,85	2036,74	11
4	0,083	5,75	6,10	7,13	948	2534,55	0,84	2136,88	12
5	0,083	5,75	6,10	7,09	1045	2795,75	0,85	2362,41	11
6	0,083	5,75	6,10	7,11	915	2445,69	0,85	2075,90	11
7	0,083	5,75	6,10	7,11	1093	2925,01	0,84	2444,43	12
8	0,083	5,75	6,10	7,09	1044	2793,06	0,84	2344,50	13
9	0,083	5,75	6,10	7,10	1102	2949,24	0,84	2470,29	12
10	0,083	5,75	6,10	7,04	951	2542,63	0,84	2139,12	13
11	0,083	5,75	6,10	7,09	1056	2825,38	0,85	2398,18	10
12	0,083	5,75	6,10	7,07	1109	2968,09	0,85	2513,68	14
13	0,083	5,75	6,10	7,03	1000	2674,58	0,84	2245,04	13
14	0,083	5,75	6,10	7,12	1088	2911,55	0,84	2454,72	11
15	0,083	5,75	6,10	7,06	1025	2741,9	0,84	2296,61	12
16	0,083	5,75	6,10	7,07	941	2515,7	0,85	2125,77	12
17	0,083	5,75	6,10	7,08	1077	2881,92	0,84	2424,56	11
18	0,083	5,75	6,10	7,11	1063	2844,23	0,84	2376,92	14
19	0,083	5,75	6,10	7,05	998	2669,19	0,85	2255,47	12
20	0,083	5,75	6,10	7,10	973	2601,87	0,84	2188,96	13
21	0,083	5,75	6,10	7,14	946	2529,17	0,84	2113,63	10
22	0,083	5,75	6,10	7,12	971	2596,49	0,85	2194,03	9
23	0,083	5,75	6,10	7,08	945	2526,47	0,84	2125,52	12
24	0,083	5,75	6,10	7,09	975	2607,26	0,84	2178,89	13
25	0,083	5,75	6,10	7,14	972	2599,18	0,85	2196,31	10
26	0,083	5,75	6,10	7,12	1003	2682,66	0,84	2256,92	13
27	0,083	5,75	6,10	7,06	959	2564,17	0,84	2142,88	11
28	0,083	5,75	6,10	7,09	973	2601,87	0,85	2198,58	12
29	0,083	5,75	6,10	7,11	981	2623,42	0,84	2207,08	12
30	0,083	5,75	6,10	7,10	999	2671,89	0,84	2232,90	13

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.9. Datos y cálculos de densidades y vacíos para estadística

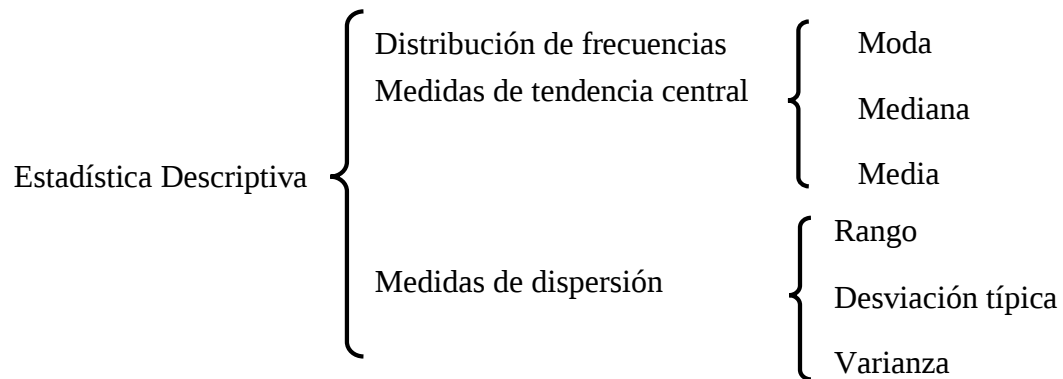
N° de probeta	% Zycotherm	% de Asfalto		Peso Briqueta			Volumen	Densidad		Vacíos		
		base Mezcla	base Agregados	seco	sat. Sup. Seca	sumergida en agua	probeta	densidad real	densidad máx. teórica	% de vacíos mezcla total	V.A.M.(vacíos agregado)	R.B.V. (relación)
		%	%	gr	gr	gr	cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	%	%	%
1	0,083	5,75	6,10	1182,3	1183,8	707	476,8	2,48	2,58	3,94	18,02	78,12
2	0,083	5,75	6,10	1184,4	1184,9	706	478,9	2,47	2,58	4,19	18,24	77,00
3	0,083	5,75	6,10	1182,1	1183,8	706	477,8	2,47	2,58	4,16	18,21	77,15
4	0,083	5,75	6,10	1182,5	1183,7	707	476,7	2,48	2,58	3,91	17,99	78,29
5	0,083	5,75	6,10	1180,1	1180,5	704	476,5	2,48	2,58	4,06	18,12	77,59
6	0,083	5,75	6,10	1179,4	1181,3	705	476,3	2,48	2,58	4,08	18,14	77,52
7	0,083	5,75	6,10	1178,8	1179,0	703	476,0	2,48	2,58	4,07	18,13	77,57
8	0,083	5,75	6,10	1180,3	1180,7	705	475,7	2,48	2,58	3,88	17,97	78,39
9	0,083	5,75	6,10	1181,2	1180,2	703	477,2	2,48	2,58	4,11	18,17	77,36
10	0,083	5,75	6,10	1180,0	1181,2	705	476,2	2,48	2,58	4,01	18,08	77,83
11	0,083	5,75	6,10	1183,5	1184,5	708	476,5	2,48	2,58	3,78	17,89	78,84
12	0,083	5,75	6,10	1185,9	1185,7	707	478,7	2,48	2,58	4,03	18,10	77,72
13	0,083	5,75	6,10	1182,0	1183,3	706	477,3	2,48	2,58	4,07	18,13	77,56
14	0,083	5,75	6,10	1183,7	1184,5	707	477,5	2,48	2,58	3,97	18,04	78,00
15	0,083	5,75	6,10	1184,2	1180,9	703	477,9	2,48	2,58	4,01	18,08	77,82
16	0,083	5,75	6,10	1180,9	1181,3	705	476,3	2,48	2,58	3,96	18,03	78,07
17	0,083	5,75	6,10	1183,5	1179,8	702	477,8	2,48	2,58	4,05	18,11	77,66
18	0,083	5,75	6,10	1178,9	1180,1	704	476,1	2,48	2,58	4,08	18,14	77,52
19	0,083	5,75	6,10	1182,3	1180,6	703	477,6	2,48	2,58	4,10	18,16	77,40
20	0,083	5,75	6,10	1181,6	1181,7	705	476,7	2,48	2,58	3,98	18,05	77,96
21	0,083	5,75	6,10	1182,8	1183,9	707	476,9	2,48	2,58	3,92	18,00	78,22
22	0,083	5,75	6,10	1183,5	1183,7	706	477,7	2,48	2,58	4,03	18,09	77,75
23	0,083	5,75	6,10	1182,7	1183,8	706	477,8	2,48	2,58	4,11	18,17	77,37
24	0,083	5,75	6,10	1185,2	1185,3	707	478,3	2,48	2,58	4,01	18,08	77,83
25	0,083	5,75	6,10	1184,7	1181,8	703	478,8	2,47	2,58	4,15	18,20	77,20
26	0,083	5,75	6,10	1180,6	1181,3	705	476,3	2,48	2,58	3,98	18,05	77,96
27	0,083	5,75	6,10	1184,3	1180,4	702	478,4	2,48	2,58	4,10	18,16	77,41
28	0,083	5,75	6,10	1180,3	1180,6	704	476,6	2,48	2,58	4,06	18,13	77,58
29	0,083	5,75	6,10	1181,7	1181,8	705	476,8	2,48	2,58	3,99	18,06	77,91
30	0,083	5,75	6,10	1178,5	1182,1	706	476,1	2,48	2,58	4,11	18,16	77,37

Fuente: Elaboración propia

4.7.Tratamiento estadístico aplicado

Se puede dividir la estadística en dos grandes ramas: la estadística Descriptiva y la estadística Inferencial.

Estadística Descriptiva: Son procedimientos empleados para organizar y resumir conjuntos de observaciones en forma cuantitativa. El resumen de ellos puede hacerse mediante tablas, gráficos o valores numéricos. Los conjuntos de datos que contienen observaciones de más de una variable permiten estudiar la relación o asociación que existe entre ellas.



Medidas de tendencia central o posición: Corresponden a valores que generalmente se ubican en la parte central de un conjunto de datos. Forma como los datos pueden condensarse en un solo valor central alrededor del cual todos los datos muestrales se distribuyen.

Media Aritmética: Es la suma de todas las observaciones dividida entre el número total de observaciones. Expresada de forma más intuitiva, podemos decir que la media aritmética es la cantidad total de la variable distribuida a partes iguales entre cada observación. Se calcula de la siguiente manera:

Para datos no agrupados:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Para datos agrupados:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k m_i f_i}{n}$$

Donde: m_i = Punto medio de la clase i

f_i = Frecuencia absoluta de la clase i

k = Cantidad de clases

Mediana: Es el valor que ocupa la posición central de un conjunto de observaciones, una vez que han sido ordenados en forma ascendente o descendente. Divide al conjunto de datos en dos partes iguales. Se calcula de la siguiente manera:

Para datos no agrupados:

Si n es impar: posición donde se ubica la mediana es igual a $(n+1)/2$.

Si n es par: $(n+1)/2$ no es entero, por lo tanto la mediana será igual al promedio de las dos posiciones centrales.

Datos agrupados:

clase mediana es la que contiene a la observación que ocupa la posición $n/2$.

$$Md = Lm + \frac{\frac{n+1}{2} - F(x_{m-1})}{f(x_m)} Cm$$

Donde: Lm = Límite inferior de la clase mediana.

$F(x_{m-1})$ = Frecuencia acumulada de la clase anterior a la clase mediana.

$f(x_m)$ = Frecuencia absoluta de la clase mediana.

Cm = Amplitud de la clase mediana.

Moda: Observación o clase que tiene la mayor frecuencia en un conjunto de observaciones. Un conjunto de datos puede ser unimodal, bimodal o multimodal.

Es la única medida de tendencia central que se puede determinar para datos de tipo cualitativo. Para datos no agrupados: es simplemente la observación que más se repite.

Para datos agrupados:

$$Mo = Lim + \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} Cm$$

Donde: Lim = Límite inferior de la clase modal.

Δ_1 = Diferencia entre f_i de la clase modal y la anterior.

Δ_2 = Diferencia entre f_i de la clase modal y la posterior.

C_m = Amplitud de la clase modal (clase de mayor frecuencia).

Medidas de dispersión, variación o variabilidad: Son valores numéricos que indican o describen la forma en que las observaciones están dispersas o diseminadas, con respecto al valor central. Son importantes debido a que dos muestras de observaciones con el mismo valor central pueden tener una variabilidad muy distinta.

Rango: Está determinado por los dos valores extremos de los datos muestrales, es simplemente la diferencia entre la mayor y menor observación. Es una medida de dispersión absoluta, ya que depende solamente de los datos y permite conocer la máxima dispersión. Casi no se emplea debido a que depende únicamente de dos valores. No proporciona una medida de variabilidad de las observaciones con respecto al centro de la distribución.

Varianza: Es un valor numérico que mide el grado de dispersión relativa porque depende de la posición de los datos $x_1, x_2, \dots, x_n$ con respecto a la media. Es el promedio al cuadrado de las desviaciones de cada observación con respecto a la media. Notación: $s^2, \sigma^2, \text{var}(X)$

Para datos no agrupados:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$$
$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - \bar{x}^2$$

Para datos agrupados en una distribución de frecuencias:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (m_i - \bar{x})^2 \times f_i}{n}$$
$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^k m_i^2 \times f_i}{n} - (\bar{x})^2$$

A continuación, la aplicación de estadística descriptiva a los valores obtenidos de las Estabilidades Marshall en estudio:

Tabla 4.10. Resultados de estadística descriptiva

Estabilidad (lb)	
Media	990,767
Error probable	12,519
Mediana	972
Moda	972
Desviación estándar	68,571
Varianza de la muestra	4702,047
Curtosis	0,157
Coficiente de asimetría	0,00067
Rango	295
Mínimo	814
Máximo	1109
Suma	29723
Cuenta	30
Nivel de confianza	25,605

Fuente: Elaboración propia

A partir de estos resultados se logra generar las gráficas correspondientes a las distribuciones estadísticas. De cada gráfico se puede apreciar la media, y los valores superior e inferior de acuerdo al error probable, es decir que, para eliminar tener el menor error probable, los valores deben estar los límites superior e inferior de cada análisis estadístico. Los valores del rango permitido son:

$$\text{Valor máximo} = \text{media} + \text{error probable} = 990,767 + 12,519 = 1003,286 \text{ lb.}$$

$$\text{Valor mínimo} = \text{media} - \text{error probable} = 990,767 - 12,519 = 978,248 \text{ lb.}$$

El rango admisible de resultados es: de 978,248 lb a 1003,286 lb.

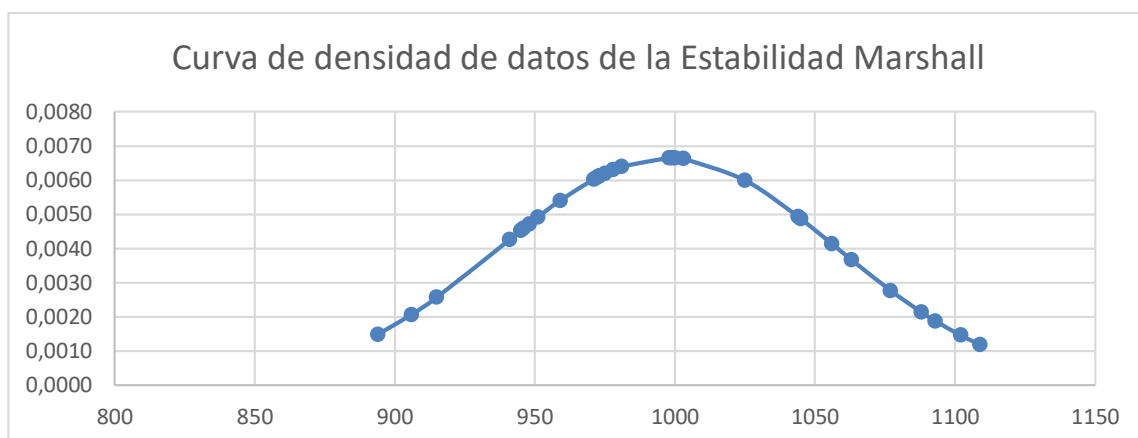
Tabla 4.11. Tratamiento estadístico a la Estabilidad Marshall método LogNormal

Nº muestra	Estabilidad (lb)	$y=\ln(x)$	Densidad	Distribución de probabilidad	Distribución teórica	Variación
1	894	6,7957	0,0015	0,04187	0,03226	0,00961
2	906	6,8090	0,0021	0,06311	0,06452	0,00141
3	915	6,8189	0,0026	0,08394	0,09677	0,01284
4	941	6,8469	0,0043	0,17225	0,12903	0,04322
5	945	6,8512	0,0045	0,18981	0,16129	0,02852
6	946	6,8522	0,0046	0,19437	0,19355	0,00082
7	948	6,8544	0,0047	0,20368	0,22581	0,02213
8	951	6,8575	0,0049	0,21814	0,25806	0,03993
9	959	6,8659	0,0054	0,25945	0,29032	0,03087
10	971	6,8783	0,0060	0,32821	0,32258	0,00563
11	972	6,8794	0,0061	0,33426	0,35484	0,02058
12	973	6,8804	0,0061	0,34036	0,38710	0,04674
13	973	6,8804	0,0061	0,34036	0,41935	0,07900
14	975	6,8824	0,0062	0,35267	0,45161	0,09895
15	978	6,8855	0,0063	0,37142	0,48387	0,11245
16	981	6,8886	0,0064	0,39049	0,51613	0,12564
17	998	6,9058	0,0067	0,50222	0,54839	0,04617
18	999	6,9068	0,0067	0,50887	0,58065	0,07177
19	1000	6,9078	0,0067	0,51552	0,61290	0,09738
20	1003	6,9108	0,0066	0,53545	0,64516	0,10971
21	1025	6,9324	0,0060	0,67580	0,67742	0,00162
22	1044	6,9508	0,0049	0,78022	0,70968	0,07054
23	1045	6,9518	0,0049	0,78513	0,74194	0,04319
24	1056	6,9622	0,0041	0,83475	0,77419	0,06056
25	1063	6,9689	0,0037	0,86212	0,80645	0,05567
26	1077	6,9819	0,0028	0,90716	0,83871	0,06845
27	1088	6,9921	0,0021	0,93409	0,87097	0,06312
28	1093	6,9967	0,0019	0,94412	0,90323	0,04090
29	1102	7,0049	0,0015	0,95911	0,93548	0,02363
30	1109	7,0112	0,0012	0,96836	0,96774	0,00062

Fuente: Elaboración propia

De esta tabla se observa que la variación final es menor a 1, por lo tanto son datos aceptables, sin embargo debe realizarse una prueba de ajuste para ver si la variación es mínima.

Gráfico 4.8. Variación de densidad de datos de la Estabilidad Marshall



Fuente: Elaboración propia

Prueba de bondad de ajuste:

La prueba de bondad de ajuste aplicada es el método de Chi cuadrado, dando los siguientes resultados :

Tabla 4.12. Prueba de bondad de ajuste Chi cuadrado

Nº	Limite inferior	Límite superior	Frecuencia Observada	Frecuencia Esperada	Chi cuadrado x²
1	894	902,9	1,0	3	1,33
2	902,9	933,1	2,0	3	0,33
3	933,1	954,8	5,0	3	1,33
4	954,8	973,4	5,0	3	1,33
5	973,4	990,8	3,0	3	0,00
6	990,8	1008,1	4,0	3	0,33
7	1008,1	1026,7	1,0	3	1,33
8	1026,7	1048,5	2,0	3	0,33
9	1048,5	1078,6	3,0	3	0,00
10	1078,6	1109,0	4,0	3	0,33
				Sumatoria x²	6,67
				Grados de libertad	7
				95% confianza	Significacia para x²

Fuente: Elaboración propia

Observando la tabla 4.12, la sumatoria de valores Chi cuadrado resulta 6,67 con 7 grados de libertad, y el valor de significancia para 95% de confianza es igual a 14,067, por tanto 6,67 al ser menor que 14,067, significa que los datos sí se ajustan y se aceptan los resultados obtenidos al 95%.

4.8. Análisis de adherencia con el aditivo Zycotherm

La perfecta colaboración entre el ligante y los agregados evita que el agua se interponga entre los dos materiales, pues esto causa consecutivamente un envejecimiento temprano de la mezcla bituminosa y anticipa el desencadenamiento de interrupciones que resultan en la pérdida de las prestaciones de parte del pavimento. La adhesión entre los agregados y el ligante asfáltico se puede asegurar mediante el uso de activadores de la adhesión, como es el caso del aditivo Zycotherm.

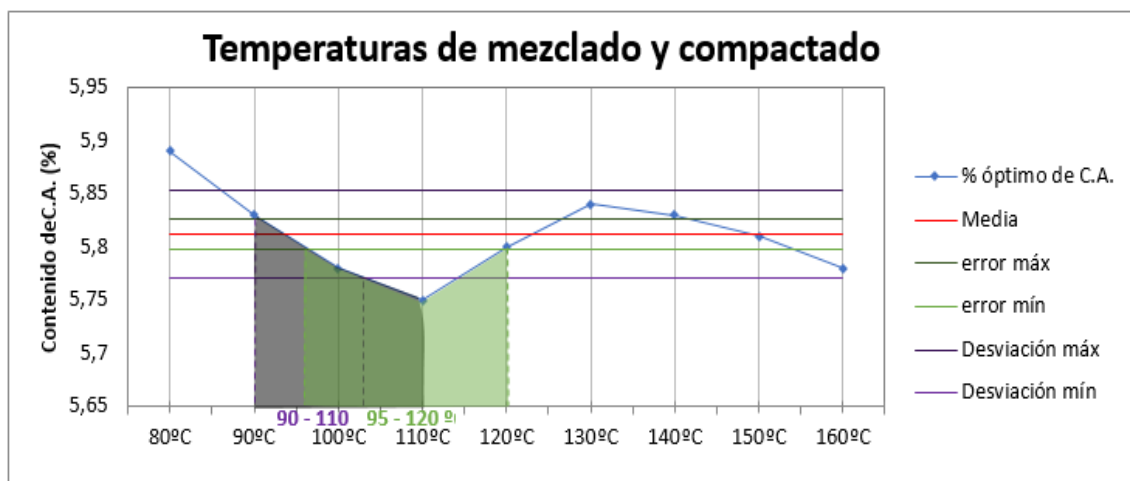
Durante la realización de las mezclas asfálticas, se observa claramente que el cemento asfáltico al estar más fluido con diferentes contenidos de Zycotherm, permite un mezclado más rápido, y un mejor recubrimiento del agregado; este dato es muy importante, porque influye en el compactado, visiblemente más homogéneo, además las mezclas con Zycotherm no generan desprendimiento al desmoldar las briquetas, lo cual ocurre lo contrario con las briquetas sin Zycotherm, que sí genera algo de desprendimiento de agregados, por lo tanto se concluye que este aditivo permite aumento de la adherencia entre la superficie del agregado con el cemento asfáltico, lo que reduce notablemente los problemas de desprendimiento.

4.9. Temperatura de mezclado y de compactado

Si analizamos las temperaturas de mezclado, en obra nunca será igual a la temperatura de compactado, por lo tanto, para las mezclas tibias, debe tener un rango de tolerancia para ambos tipos.

Para ello se crea el siguiente gráfico:

Gráfico 4.9. Rangos de temperaturas de mezclado y compactado



Fuente: Elaboración propia

De este gráfico podemos concluir que el rango de temperatura de mezclado debe estar entre 95°C a 120°C y la temperatura de compactación no debe ser menor a 90°C.

4.10. Precio unitario de las mezclas con y sin aditivo Zycotherm.

El costo del Zycotherm es de 30 \$us el litro, su costo resulta ser regular en comparación a otros aditivos químicos que se encuentran en el mercado con parecidas características y finalidad.

Según la presente investigación se procede a realizar los precios unitarios de dos mezclas la primera es una mezcla convencional caliente sin aditivo, y la segunda es una mezcla tibia modificada con Zycotherm, el resultado final se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 4.13. Variación de precios unitarios

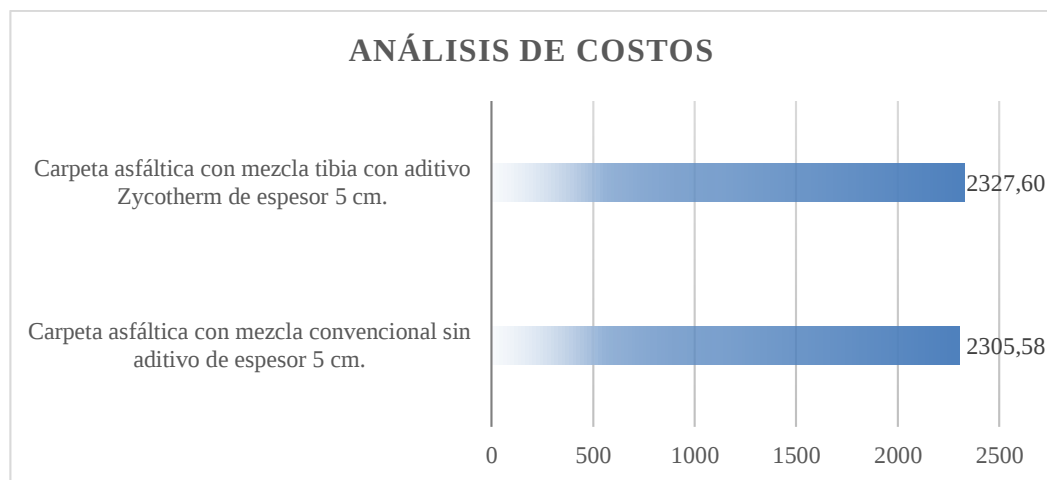
Descripción	Precio Total para 1 m ³ (Bs.)	Volumen de mezcla compactada para 1 m ² (m ³)	Precio Unitario para 1 m ² (Bs.)
Carpeta asfáltica con mezcla convencional sin aditivo de espesor 5 cm.	2305,58	0,05	115,28
Carpeta asfáltica con mezcla tibia con aditivo Zycotherm de espesor 5 cm.	2327,60	0,05	116,38

Fuente: Elaboración propia

En base a los precios unitarios para una carpeta de pavimento, se evidencia que hay cierta diferencia en costos entre las mezclas convencionales en caliente sin aditivo y las mezclas tibias con uso de aditivo, esto influenciado directamente por el costo del asfalto y la temperatura de mezclado.

Las mezclas con aditivo tuvieron una ligera disminución del precio unitario de pavimento, aunque esta diferencia se ve más significativa cuando se habla del costo por kilómetro de pavimento.

Gráfico 4.10. Precios unitarios para una carpeta de e=5cm



Fuente: Elaboración propia

Además de reducirse el costo de las mezclas con la incorporación del Zycotherm, este brinda propiedades adicionales que a largo plazo reducirían los costos de mantenimiento, que son los más costosos en cualquier carretera de pavimento flexible.

Según el análisis de precios unitarios de producción de mezcla asfáltica con y sin aditivo en iguales condiciones de diseño y agregados; se tiene que comparando los costos de producción de mezcla asfáltica tibia con uso de aditivo se cumple con las características propias este tipo de mezclas y además se puede evidenciar teóricamente la ventaja económica de reducción de costo en grandes cantidades de mezcla asfáltica para tendido de capas de rodadura de pavimento flexible, con el ejemplo referencial de espesor de 5 cm.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se logra concretar el análisis de mezclas asfálticas tibias, haciendo uso del Aditivo Zycotherm, dentro de un rango de temperaturas de mezclado desde 80°C hasta 160°C, para comparar estos resultados con los resultados reflejados en las tablas correspondientes una mezcla estándar convencional producida en caliente, cumpliendo con el objetivo general planteado en el presente trabajo investigativo. Los beneficios o mejoras propuestas correspondientes a dicho proceso innovador se transmiten en las siguientes conclusiones.
- Mediante los ensayos de laboratorio se logró caracterizar los agregados (fino y grueso) correspondientes para el diseño de las mezclas asfálticas generando de esta manera las curvas granulométricas aceptables propias de los mencionados agregados.
- Se logra determinar la temperatura óptima de mezclado una mezcla tibia igual 110°C de y el contenido óptimo del aditivo Zycotherm igual a 0.083%. Por otra parte, estos valores determinan resultados cuyos valores cumplen las normas y precautelan la economía con el uso del aditivo
- La mezcla con aditivo presenta mejoras cualitativas al tener un aspecto más oscuro y brillante, además de no presentar ninguna dificultad en el proceso de mezclado de los elementos componentes de la mezcla, estando todos estos elementos a una temperatura marcada por nuestros parámetros como “tibia”.
- A temperaturas tibias se logra observar una adherencia casi inmediata producida entre el cemento asfáltico y el agregado pétreo gracias a la acción del aditivo Zycotherm sin necesidad de llegar a un punto calórico elevado.

- Gracias a las características propias del aditivo que actúa directamente sobre el cemento asfáltico y que hace que los asfaltenos tengan mayor reacción química sobre las resinas asfálticas, se logra proporcionar mayor fluidez dentro de la mezcla, y de esta manera evitar la oxidación temprana del asfalto. Dando como resultado una mezcla asfáltica más trabajable a nivel de compactación in situ y generando protección efectiva contra los factores climáticos, proporcionando, además, mayor durabilidad gracias a las ventajas antes citadas.
- La posibilidad confirmada de compactar la mezcla asfáltica a menor temperatura, sin descuidar la eficacia de las condiciones técnicas, características específicas y volumétricas propias de una buena mezcla asfáltica; es un indicativo veraz de que la distancia de acarreo puede ser optimizada, pudiéndose realizar trabajos en lugares alejados de la planta de producción de mezclas asfálticas; lo cual representa una gran ventaja de trabajabilidad, optimización de recursos económicos y más importante aún las condiciones positivas de manipulación de la mezcla por el personal en obra.
- Al haber realizado los ensayos de laboratorio a una temperatura tibia, se evidencia que existe una diferencia positiva en cuanto a la disminución del uso de combustible para calentar los elementos componentes de la mezcla asfáltica, además vale resaltar también que se puede observar menos emisión de gases propios de dicha producción; por lo cual se plantea el uso de este tipo de técnicas productivas como alternativa eficiente técnica y económicamente en favor de la industria de la construcción y el mantenimiento sostenible del medio ambiente.
- Después del análisis estadístico, se observan algunos porcentajes de errores elevados, es posible que sea porque en el momento de realizar las 30 briquetas fue complicado controlar la temperatura de 110°C, por la falta de equipos de control de temperaturas exactas.

- Dentro del estudio económico de costos productivos de mezcla asfáltica con uso de aditivo se puede justificar plenamente que este tipo de nanotecnología
- Se cumplieron con los objetivos planteados en este trabajo, ya que se logra obtener las propiedades técnicas Marshall tanto para mezclas calientes. como para mezclas tibias con uso de aditivo, existiendo una clara diferencia de resultados entre sí, a pesar de diseñar las mezclas con el mismo tipo de agregado pétreo. Con resultados aceptables en ambos casos, pero demostrando que con el uso de aditivo se llega a mantener y mejorar condiciones técnicas propias de las mezclas asfálticas.
- Habiendo observado el proceso productivo de Mezclas asfálticas tibias con uso de aditivo Zycotherm, se crea aun concepto positivo acerca del uso de este método novedoso, de manera que se concluye técnicamente que los aspectos benéficos propios de este proceso son:
 - Mejoras Operativas (fabricación, puesta en obra)
 - Mejoras de Calidad (terminación del producto y especificaciones)
 - Mejoras de Durabilidad
 - Mejoras en Coste

5.2. Recomendaciones

- El resultado de la temperatura óptima de ensayo de una mezcla tibia es de 110°C, sin embargo, es muy difícil controlar esta temperatura durante la aplicación, por lo tanto, se recomienda usar valores $\pm 5^{\circ}\text{C}$, no pasar de esa tolerancia, porque se estaría variando los resultados finales.
- A partir del conocimiento adquirido en cuanto se refiere a mezclas asfálticas tibias con uso de aditivo, se puede recomendar el uso de dichas mezclas en la pavimentación de vías terrestres en nuestro medio en busca de la optimización de recursos y materiales.

- Se recomienda de manera positiva el constante estudio y búsqueda de nuevos métodos de producción de mezclas asfálticas, debido a que la investigación científica de características relacionadas a la ingeniería de caminos, está íntimamente relacionada con la vanguardia de la tecnologización de los laboratorios que se usan para este tipo de trabajos. Por lo cual es importante mantener los laboratorios de nuestro medio en constante actualización y mantenimiento.
- Se recomienda que la elección del material de fabricación de mezclas asfálticas sea de rigurosa calidad para el éxito de la puesta en funcionamiento de las vías de comunicación que vayan a ser construidas, sean estas con el uso de técnicas conocidas o de aplicación de técnicas novedosas. Para este fin se debe tener conocimiento de las diferentes técnicas de caracterización de elementos materiales que son parte de la producción de las mezclas asfálticas.
- Del estudio realizado sobre la utilización de aditivos dentro de la fabricación o preparación de mezclas asfálticas, se recomienda que debemos contemplar la disponibilidad y existencia en nuestro medio de dichos aditivos; puesto que al estar de cierta manera acostumbrados al uso común de métodos conocidos, dejamos de lado la innovación que nos ofrecen las empresas comercializadoras de aditivos y productos que intervengan de manera positiva en las especificaciones técnicas de la producción de mezclas asfálticas además de las ventajas económicas que puedan ofrecer el uso de estos productos a mediano y largo plazo.