

CAPÍTULO I
ANTECEDENTES

CAPÍTULO I

1. ANTECEDENTES

DISEÑO TEÓRICO

1.1. DETERMINACIÓN DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

1.1.1. Determinación de la línea de estudios. Argumentos

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. La falta de alguno de ellos afecta el conjunto y puede sufrir de distintos tipos de fallas.

Al ser los agregados un 90% de la mezcla asfáltica, la evaluación de las mezclas a través de diferentes ensayos de resistencia y permeabilidad, variando entre diferentes tipos de granulometría, es una forma de poder obtener un tipo de granulometría más acertado, para cumplir de forma eficiente los requerimientos necesarios de las mezclas asfálticas o a pesar de estar fuera de los límites granulométricos, por diferentes motivos constructivos, se puedan cumplir las exigencias mecánicas.

1.1.2. Breve descripción de causales identificados

Para identificar las causales se siguió la siguiente técnica en función de responder las preguntas realizadas sobre el tópico elegido, como ser:

- ¿Qué son las mezclas asfálticas?
- ¿Qué componente tienen las mezclas asfálticas?
- ¿Para qué sirve mezclas asfálticas?
- ¿Cumple siempre el para qué sirve las mezclas asfálticas?
- ¿Qué elementos afectan a las mezclas asfálticas?

Donde se debe observar cada componente y pensar en alguna deficiencia que este pudiera tener, formular y escribir afirmaciones negativas de cada una de las ideas que se imagina, mostradas a continuación:

Causales ubicadas en respuestas a las preguntas definidas

- A pesar de la información que existe de mezclas asfálticas locales se siguen creando mezclas fallidas por uso de materiales erróneos.
- No existe una evaluación profunda de los elementos que componen una mezcla asfáltica en nuestro medio.
- Existe muchas fallas en las vías construidas, por no utilizar agregados pétreos debidos.
- Se observa que los criterios de elección de agregados son sin un análisis profundo.
- Hay pocos estudios a cerca de como afectan los componentes de la mezcla, como la granulometría local, en sus diversas propiedades.

1.1.3. Identificación del objeto de estudio

A continuación se siguieron los siguientes pasos concretos para la identificación del objeto de estudio:

- Causales ubicadas en respuestas a preguntas definidas
- Configuración de las causales utilizando el NO

No hay demasiada eficiencia en las mezclas asfálticas locas por uso de materiales erróneos.

No existe una evaluación profunda de los elementos que componen una mezcla asfáltica en nuestro medio.

No se usan agregados pétreos correctos por lo que existen muchas fallas en las vías construidas.

No hay un análisis profundo en los criterios de elección de agregados pétreos.

No hay muchos estudios a cerca de como afectan los componentes de la mezcla, como la granulometría local, en sus diversas propiedades.

- Selección de causales
- Causales seleccionados

No se usan agregados pétreos correctos por lo que existen muchas fallas en las vías construidas.

No hay un análisis profundo en los criterios de elección de agregados pétreos.

No hay muchos estudios a cerca de como afectan los componentes de la mezcla, como la granulometría local, en sus diversas propiedades.

- Configuración de cambio del NO por el SI
 1. Si se usan agregados pétreos correctos por lo que existen muchas fallas en las vías construidas.
 2. Si hay un análisis profundo en los criterios de elección de agregados pétreos.
 3. Si hay muchos estudios a cerca de como afectan los componentes de la mezcla, como la granulometría local, en sus diversas propiedades.
- Aplicación de la conexión de la simple implicación ***si p entonces q***

Tabla 1.1 Aplicación de la conexión de la simple implicación *si p entonces q*

P	1	1	2	3	2	3
Q	2	3	1	1	3	2
Sentido	V	F	V	V	V	V

Fuente: Elaboración propia

La proposición que tuvo más verdaderos fue seleccionada como el objeto de estudio, es decir:

La granulometría en las mezclas asfálticas.

1.1.4. Determinación de la perspectiva de solución

Evaluar la incidencia de tipos de granulometrías a partir de la disponibilidad de los diferentes tamaños nominales, en propiedades físicas y mecánicas en una mezcla asfáltica, en busca de una granulometría más acertada que pueda cumplir con las especificaciones técnicas requeridas.

1.2. MARCO TEÓRICO

Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de firmes, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a la explanada para que sean soportadas por éstas 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. Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráficos pesados intensos.

Las mezclas asfálticas son una combinación de agregados pétreos (90%), de polvo mineral (5%) y ligante asfáltico (5%), aproximadamente.

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

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

Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y

lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

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

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) esta relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna, en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y mas áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla.

Cuando no hay agregados disponibles con características de alta fricción interna, se pueden usar mezclar más económicas.

Impermeabilidad

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

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

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

Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento. (El periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye. Así mismo un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

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

Las propiedades mencionadas son afectadas directamente por los agregados usados en la mezcla asfáltica, por lo que se evaluará la incidencia de los diferentes tipos de granulometrías.

Granulometría

Se denomina clasificación granulométrica o granulometría, a la medición y gradación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los

materiales sedimentarios, así como de los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

Granulometría por tamizado

Es un proceso mecánico mediante el cual se separan las partículas de un suelo en sus diferentes tamaños, denominado a la fracción menor (Tamiz No 200) como limo, Arcilla. Se lleva a cabo utilizando tamices en orden decreciente. La cantidad de suelo retenido indica el tamaño de la muestra, esto solo separa una porción de suelo entre dos tamaños.

El análisis granulométrico por tamizado se realiza a las partículas con diámetros superiores a 0,075 mm. (Malla 200), este ensayo se realice con una serie de mallas normalizadas dispuestas en orden decreciente.

Tabla 1.2 Tamaños de tamices

Tamaños nominales de abertura	
(mm)	ASTM
75	3"
63	2 1/2"
50	2"
37.50	1 1/2"
25.00	1"
19.00	3/4"
9.50	3/8"
4.75	Nº4
2	Nº10
0.425	Nº40
0.075	Nº200

Fuente: Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia

Tabla 1.3 Cantidad mínima de muestra para granulometría según tamaño max absoluto del suelo

Tamaño máximo absoluto (mm)	Cantidad mínima de muestra a extraer en terreno (Kg)	Cantidad mínima de muestra para el ensaye (Kg)
5	2	0.5
10	8	2
20	20	5
25	40	10
50	60	15
80	80	20
100	120	30
150	160	40

Fuente: Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia

La granulometría se expresa como porcentaje acumulado que pasa por cada tamiz, indicando como primer resultado el de menor tamiz en que pasa el 100% y expresando el resultado para los siguientes tamices como la diferencia entre el porcentaje que pasa en el tamiz inmediatamente anterior al del cálculo y el retenido en el tamiz de cálculo.

Los resultados obtenidos de la granulometría pueden expresarse en forma gráfica en un sistema de coordenadas ortogonales; en las abscisas, a escala logarítmica, se indican las aberturas de los tamices y en las ordenadas, a escala lineal, los valores de los porcentajes que pasan en cada tamiz obtenidos.

Los ensayos para la caracterización del asfalto según la Norma Boliviana a utilizarse en este trabajo son ensayo de penetración, punto de inflamación, ductilidad. Para la caracterización de los agregados son ensayos de granulometría, peso específico y equivalente de arena.

Para medir la incidencia de los diferentes tipos de granulometrías se utilizaran los ensayos a las briquetas de densidad real y ensayo de Marshall.

Densidad real de mezclas asfálticas

Densidad (ρ)

Es el cociente entre la masa (m) de una sustancia y su volumen (v) a una temperatura especificada. Se expresa en kilogramos por metro cúbico (Kg/m^3).

Densidad real (G)

Densidad en que se considera el volumen macizo de la probeta, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles.

Secado hasta masa constante

Límite de secado a $50 \pm 5^\circ\text{C}$, en que dos pesadas sucesivas difieren en un porcentaje igual o inferior al 0.1% de la menor masa determinada. La muestra debe dejarse en horno a $50 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 12 h y luego pesarse cada 2h.

Ésta investigación se dedicará a realizar una serie de ensayos granulométricos, con agregados locales, curvas que serán utilizadas en la realización de probetas de mezclas asfálticas.

Entonces, la elección del tipo de granulometría es uno de los factores que afectan de forma directa a las condiciones físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica, por tanto su análisis no debe pasar desapercibido, por su importancia en el comportamiento futuro en la carpeta asfáltica de la que es parte, afectando directamente a la vida útil de la carretera y por consecuencia al costo total de la vía, uno de los condicionantes de la construcción de cualquier proyecto.

1.3. SITUACIÓN PROBLÉMICA

Las mezclas asfálticas son una combinación de agregados pétreos (90%), de polvo mineral (5%) y ligante asfáltico (5%), aproximadamente.

Por lo que las características de los agregados afectan de forma directa en las características de las mezclas asfálticas, por tanto su evaluación es de alta relevancia.

La ingeniería ha venido día a día, desarrollando nuevas investigaciones y técnicas, tanto en el diseño como en la construcción y evaluación de pavimentos, pues se encuentra con diferentes adversidades al momento de la ejecución de obra, uno de ellos y de los

más importantes e influyentes es la correcta dosificación granulométrica en campo, pues cuando los controles no son estrictos o se trabajan con curvas dentro de la banda solicitada, pero muy cerca de los extremos, es un error bastante común, de esta forma e alteran las propiedades de las mezclas asfálticas.

Los pavimentos flexibles están formados por una base, sub base y una capa de rodadura, donde la capa de rodadura está expuesta de forma constante, por lo que su correcta dosificación y elección de componentes es vital.

Por lo que en esta investigación se busca evaluar la incidencia de diferentes tipos de granulometrías, a partir de once curvas planteadas en función de la banda granulométrica TM-40c (Fig1.1) y una tolerancia determinada en sus límites inferior y superior, en propiedades físicas y mecánicas en una mezcla asfáltica, verificando si aún saliendo de los límites granulométricos establecidos por la norma boliviana, se cumplen las especificaciones de resistencia de la mezcla asfáltica.

Tabla 1.4 Bandas granulométricas para sub base, bases y capas de rodadura

Tamiz		TM-50a	TM-50b	TM-50c	TM-40a	TM-40b	TM-40c	TM-25
	(mm)							
2"	50	100	100	100				
1 1/2"	37.50	-	70-100	-	100	100	100	
1"	25.00	55-100	55-85	70-100	70-100	80-100	80-100	100
3/4"	19.00	-	45-75	60-90	50-80	-	-	70-100
3/8"	9.50	30-75	35-65	40-75	25-50	50-80	50-80	50-80
Nº4	4.75	20-65	25-55	30-60	10-30	35-65	35-65	35-65
Nº8	2.36	-	-	-	5-15	-	-	-
Nº10	2	10-50	15-45	15-45	-	25-50	25-50	25-50
Nº40	0.425	5-30	5-25	10-30	0-5	10-30	10-30	10-30
Nº200	0.075	0-20	0-10	0-15	0-3	5-15	5-15	5-15

Fuente: Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia

1.4. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

¿De que manera, una evaluación de la incidencia de las granulometrías de agregados en las propiedades físicas y mecánicas, de mezclas asfálticas, puede determinar una selección de áridos de mayor eficiencia, a pesar de no poder cumplir con la granulometría especificada en la norma?

1.5. OBJETIVOS

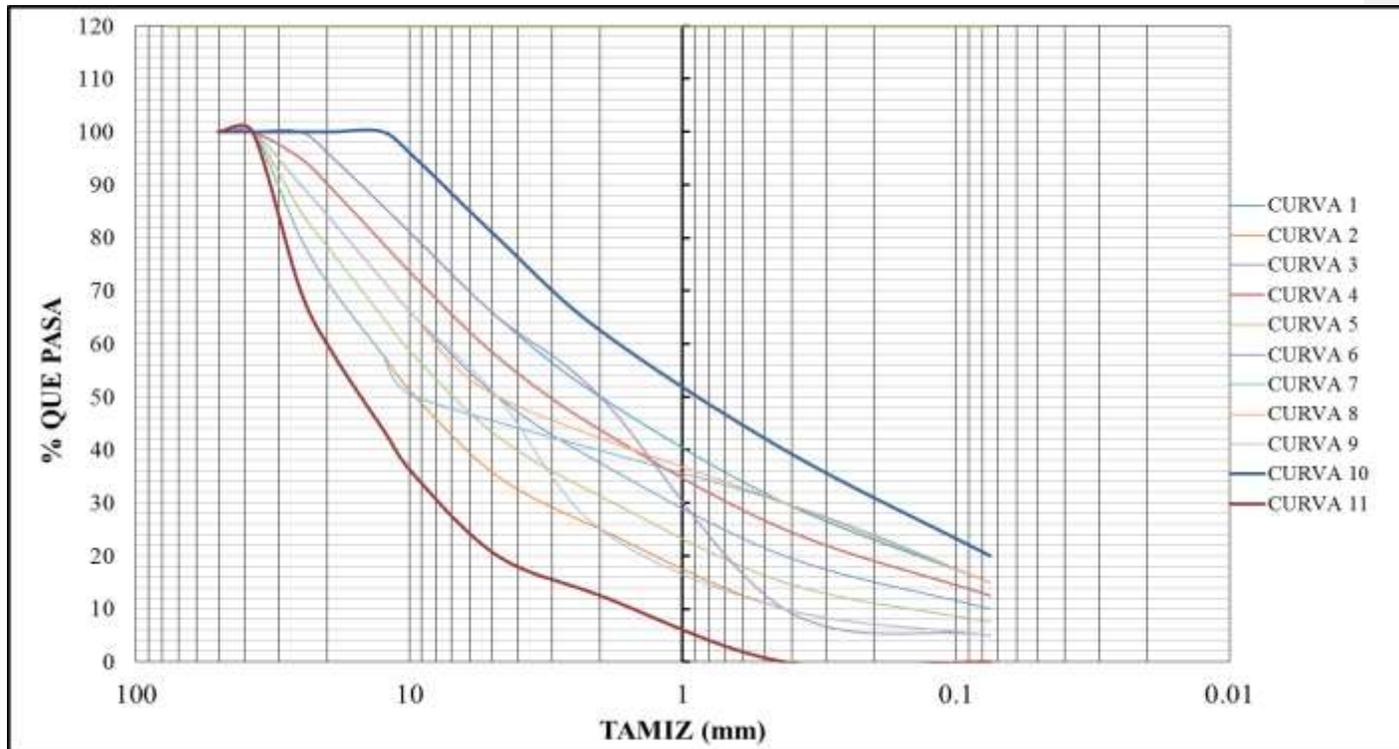
1.5.1. Objetivo general

Evaluar la incidencia de la granulometría de agregados, a pesar de la disponibilidad de tamaños nominales, en propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas, mediante pruebas de laboratorio; con el fin de que se pueda obtener un antecedente sólido que ayudará a una selección de agregados de mayor eficiencia, a pesar de sobrepasar los límites granulométricos hasta una determinada tolerancia o no (Figura1.1)

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar las características físico mecánicas del agregado pétreo, mediante ensayos de granulometría (ASTM D422), límites líquido y plástico (ASTM D4318, ASTM D431), densidad (ASTM E127), equivalente de arena (ASTM D2419), y desgaste de Los Ángeles (ASTM E131).
- Evaluar la calidad del cemento asfáltico, a través de los ensayos de penetración (ASTM D5), punto de ablandamiento (ASTM D36), punto de inflamación y combustión (ASTM D1310-01), ductilidad (ASTM D113) y densidad (ASTM D71).
- Generar diferentes combinaciones granulométricas, dentro y fuera de la banda TM-40c, límites de granulometría para carpetas de rodadura normadas por la ABC, para elaborar probetas de mezcla asfáltica.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de las probetas compactadas de mezclas asfálticas, por medio de ensayos como la densidad real y el análisis de Marshall, resistencia a la deformación plástica y fluencia.
- Evaluar la incidencia de las distintas combinaciones granulométricas, en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas.

Figura 1.1 Curvas granulométricas a partir de la banda TM-40c



Fuente: Elaboración propia

1.6. ALCANCE

Para lograr el objetivo propuesto, se plantean los siguientes alcances:

- Elaborar diferentes mezclas asfálticas a partir de diferentes combinaciones granulométricas, usando el contenido óptimo de cemento asfáltico.
- Evaluar propiedades físicas (densidad real, vacíos), y mecánicas (resistencia a la deformación plástica y fluencia), de los especímenes de concreto asfáltico, mediante ensayos de laboratorio.

1.7. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

1.7.1. Hipótesis

Si se realizan diferentes pruebas de ensayo midiendo las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas con diferente graduación de agregados, entonces se podrá evaluar la incidencia de la granulometría en estas propiedades, que guiarán a una selección de agregados eficiente, a pesar de estar fuera o no de los parámetros de granulométricos establecidos en la norma.

1.7.2. Identificación de variables

Variable independiente

Granulometría

Variable dependiente

Análisis Marshall

Densidad real

Resistencia a la deformación plástica

Variables intervinientes

Estabilidad

Vacíos en el agregado mineral

Huecos en la mezcla asfáltica

1.7.3. Conceptualización y operacionalización de las variables

Tabla 1.5 Conceptualización y operacionalización de las variables

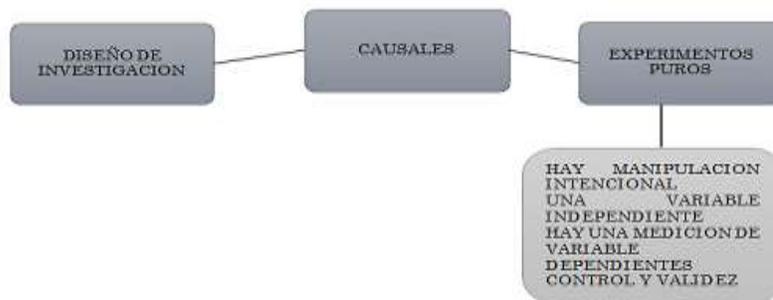
Variable	Conceptualización	Dimensiones	Indicador	Valor/Acción
Granulometría	Granulometría es la determinación de los porcentajes de grava, arena, limo y arcilla que se encuentra en cierta masa de suelo.	Diámetro máximo nominal Coeficiente de uniformidad Coeficiente de curvatura	Pulgadas, milímetros Adimensional Adimensional	Con predominancia de agregado grueso, fino e integrado.
Análisis Marshall	Medición de la resistencia a la deformación plástica de probetas cilíndricas de mezclas asfálticas, estabilidad, vacíos en el agregado mineral y huecos en la mezcla			Medir la resistencia, estabilidad, vacíos y huecos de las probetas con diferentes granulometrías
Densidad real	Se considera al volumen macizo de a probeta, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles	Densidad Real	Kilogramos por metro cúbico	Medir la densidad real de cada probeta

Fuente: Elaboración propia

DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.8. IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DEL DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Figura 1.2 Tipo de diseño de investigación



1.9. UNIDADES DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL. POR VARIABLE

1.9.1. Unidad de estudio o muestreo

Granulometrías.

1.9.2. Muestra

Mezclas asfálticas con diferentes granulometrías.

1.9.3. Muestreo

Las muestras de diferentes granulometrías para realizar la evaluación de su incidencia en las briquetas serán a partir de la banda granulométrica TM-40c; con las siguientes variaciones:

- Nueve diferentes combinaciones de ponderación entre agregado grueso, fino y polvo, dentro de la banda granulométrica ideal TM-40c.
- Curva establecida a partir del límite superior de la banda TM-40c, más la tolerancia establecida.

- Curva establecida a partir del límite inferior de la banda TM-40c, más la tolerancia establecida.

El número de ensayos se distribuirán de la siguiente manera:

Tabla 1.6 Ensayos para la caracterización de agregados y C.A.

	Ensayo	Cantidad
Cemento asfáltico	Penetración	1
	Punto de Ablandamiento	1
	Punto de Inflamación y Combustión	1
	Ductilidad	1
	Densidad	1
Agregados pétreos	Granulometría	3
	Límite Líquido	3
	Límite Plástico e Índice de Plasticidad	3
	Densidad Real, Neta y Absorción	3
	Equivalente de Arena	3
	Desgaste de los Ángeles	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.7 Ensayos para las probetas de mezclas asfálticas

Tipo de curva				Ensayos			
	Grueso (%)	Fino (%)	Polvo (%)	N° Marshall	Prob.	Densidad	Estabilidad y fluencia
Curva 1	50	35	15	3	15	15	15
Curva 2	30	65	5	3	15	15	15
Curva 3	40	50	10	3	15	15	15
Curva 4	45	42.5	12.5	3	15	15	15
Curva 5	35	57.5	7.5	3	15	15	15
Curva 6	60	35	5	3	15	15	15
Curva 7	20	50	15	3	15	15	15
Curva 8	35	50	15	3	15	15	15
Curva 9	45	50	5	3	15	15	15
Curva 10	60	20	20	3	15	15	15
Curva 11	20	80	0	3	15	15	15
Fuente: Elaboración propia			Total =	33	165	165	165

1.9.4. Justificación de factibilidad recursos insumos y medios utilizados.

La evaluación de la incidencia de diferentes granulometrías de agregados en las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas, depende de ensayos a realizarse netamente en laboratorio, con material (agregados pétreos y asfalto), de fácil accesibilidad; equipo e instrumentos que existen en las instalaciones del laboratorio de nuestra casa superior de estudios.

1.10. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS LÓGICOS

1.10.1. Listado de actividades a realizar

Caracterización de Asfalto:

- Penetración
- Punto de ablandamiento
- Punto de inflamación y combustión
- Ductilidad
- Densidad

Caracterización de Agregados:

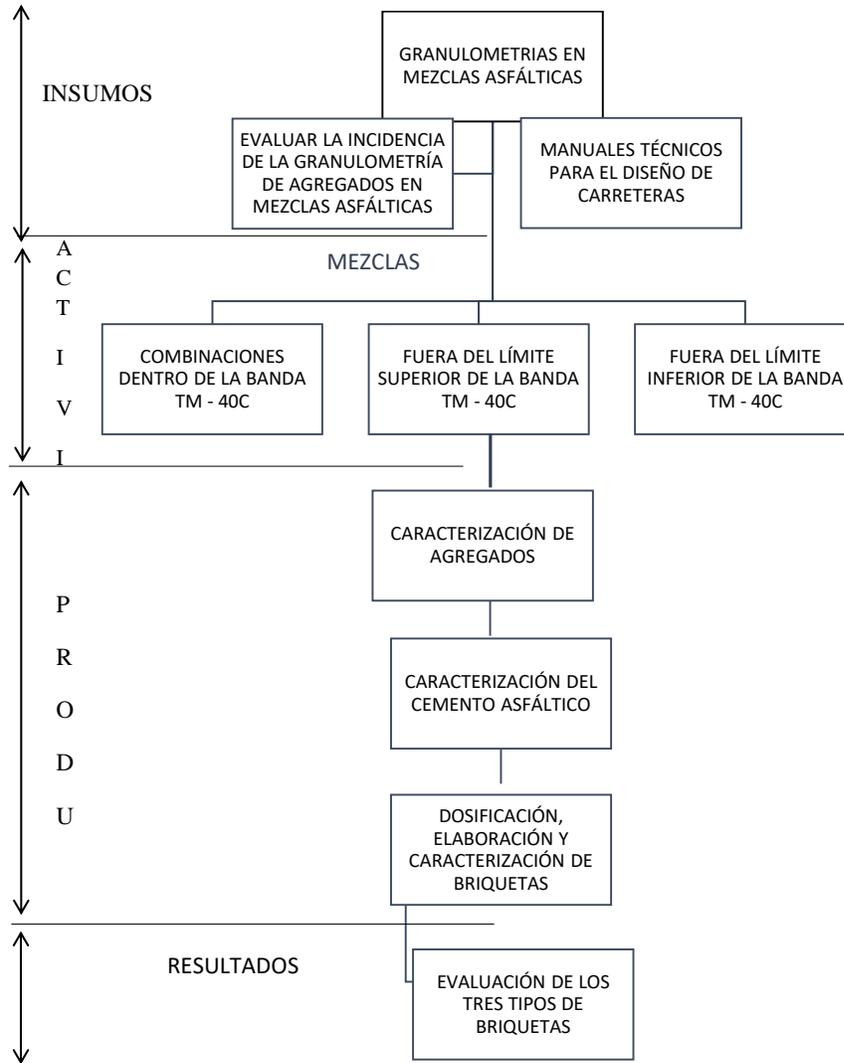
- Granulometría
- Límite líquido
- Límite plástico e índice de plasticidad
- Densidad real, neta y absorción
- Equivalente de arena
- Desgaste de los Ángeles

Evaluación de la Mezcla Asfáltica:

- Elaboración de briquetas
- Densidad real
- Ensayo Marshall (estabilidad y fluencia)

1.10.2. Esquema de actividades en función a procedimiento definido por la perspectiva

Figura 1.3 Esquema de perspectiva



Fuente: Elaboración propia

1.10.3. Productos esperados en correspondencia con el procedimiento de la perspectiva.

Según se muestra en la Fig. 1.3 se puede observar que los productos esperados son:

- Caracterización de agregados, consiste en una serie de ensayos (granulometría, peso específico, equivalente de arena), determinados por la norma boliviana para realizar una adecuada identificación de las características de los agregados pétreos.
- Caracterización de asfalto, es la realización de diferentes ensayos en laboratorio (ensayo de penetración, punto de inflamación, ductilidad), para una correcta descripción de las propiedades físicas y mecánicas del asfalto.
- Dosificación, elaboración y caracterización de briquetas, reside en determinar la cantidad de agregados, polvo mineral y asfalto a utilizarse en la confección de las briquetas, además de los ensayos (densidad real, permeabilidad, ensayo de Marshall), a realizarse para medir características físicas y mecánicas de las probetas de mezclas asfálticas.

1.10.4. Resultados esperados

Los resultados esperados de evaluar la incidencia de la granulometría de los agregados en las mezclas asfálticas, es medir mediante ensayos de laboratorio, el efecto de la variación de granulometrías en las propiedades mecánicas y otras de las mezclas asfálticas, para lo cual se fabricarán tres tipos de briquetas.

1.11. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 1.8 Número de ensayos en probetas compactadas

Densidad	33
Estabilidad	33
Fluencia	33

Fuente: Elaboración propia

Donde estos ensayos son determinados por las variables dependientes, densidad real, resistencia a la deformación plástica, flujo, huecos en la mezcla, vacíos de agregado

mineral; es decir, éstas serán las variables que brinden el resultado que se busca, que es, evaluar la incidencia de la granulometría de los agregados en las mezclas asfálticas.

1.11.1. Estadística descriptiva

Según la ASTM para un trabajo de investigación se debe realizar el análisis estadístico con un tamaño mínimo de muestras de 30.

Se realizara una estadística descriptiva para obtener las siguientes medidas de tendencia central:

Media aritmética

Es la medida más utilizada.

La media de “N” números es la suma de los mismos dividida entre N en el caso de una población, en una muestra se utilizará “n” para simbolizar el tamaño o cantidad de observaciones. Por otra parte la media poblacional se simboliza con μ y la media muestral con \bar{X}

Ec. 1.1 Media poblacional

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{N}$$

Donde:

μ = Media poblacional

N = Tamaño de población

Ec. 1.2 Media muestral

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

Donde:

\bar{Y} = Media poblacional
 n = Tamaño de muestra

Mediana

Punto medio de los valores después de ordenarlos de menor a mayor o de mayor a menor. Hay tantos valores por encima de la mediana como por debajo de ella en la ordenación de datos.

Moda

La moda es aquel valor que más veces se repite en un conjunto de datos. La moda tiene una gran utilidad cuando se tiene datos cualitativos y variables categóricas.

Desviación estándar

Una de las medidas de mayor utilidad dentro del análisis estadístico es la desviación estándar, que es una medida que considera que tan lejos de la media están localizados cada uno de los valores observados y se la define como la raíz cuadrada positiva de la varianza.

Ec. 1.3 Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

Donde:

σ = Desviación estándar
 \bar{X} = Media muestral
 N = Tamaño de población

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ASPECTOS GENERALES DE LOS PAVIMENTOS

Ilustración 2.1 Pavimento en construcción/ pavimento terminado



Fuente: Google

La superestructura de una vía, construida sobre la sub-rasante, y compuesta normalmente por la sub-base, la base y la capa de rodamiento, cuya función principal es soportar las cargas rodantes y transmitir los esfuerzos al terreno, distribuyéndose en tal forma que no se produzcan deformaciones perjudiciales, así como proveer una superficie lisa y resistente para los efectos del tránsito, definición estructural de un pavimento según la Organización de los Estados Americanos a través de su organismo técnico denominado Congresos Panamericanos de Carreteras.

El Manual de Carreteras para la ABC define un pavimento como una estructura formada por una o más capas de materiales seleccionados y eventualmente tratados, que se colocan sobre la subrasante con el objetivo de proveer una superficie de rodadura

adecuada y segura bajo diferentes condiciones ambientales y que soporta las sollicitaciones que impone el tránsito.

Un pavimento es un sistema de capas superpuestas, de diferentes materiales, y compactadas de forma adecuada.

Los pavimentos se han clasificado –convencionalmente- en flexibles y rígidos. Esta distinción obedece al tipo de superficie de rodamiento, aunque la principal diferencia se refiere a la forma cómo cada uno trabaja, cómo soporta y distribuye los esfuerzos producidos por las cargas, además de los materiales que lo conforman.

2.2. PAVIMENTO FLEXIBLE

Pavimento asfáltico es el pavimento flexible compuesto por una o mas capas de mezclas asfálticas que pueden o no apoyarse sobre una base granular y una subbase.

Un pavimento flexible clásico esta conformado por una delgada capa de rodamiento asfáltica, la cual se apoya en una base y subbase granulares, las que a su vez descansan sobre la subrasante. Con el tiempo esta conformación clásica se modificó incorporando el uso de bases estabilizadas. Es importante clarificar que la capa de rodamiento o desgaste es –por definición- de poco espesor y requiere características especiales, como buena resistencia a la fricción y al medio ambiente, no exigibles a la capa base subyacente. Esta condición puede –en casos- requerir el empleo de agregados o una mezcla especial no necesarios para otras capas. En muchos países es normal que una capa de sello –con agregados especiales- constituya la capa o superficie de rodamiento, siempre que el resto de las capas aporten la resistencia necesaria.

2.2.1. Características

Sus principales características son:

- La capacidad estructural del pavimento es proporcionada por las capacidades de aceptación y distribución de cargas de cada una de las capas que conforman la estructura.

- Son construidos en, al menos la capa superior, con material asfáltico.
- Variaciones pequeñas del suelo de fundación tienen gran incidencia en la capacidad estructural del pavimento.
- Las propiedades de las mezclas, afectan, aún cuando en menor grado, la resistencia del conjunto multicapa.

En la definición de un pavimento fueron incluidos varios términos para los cuales conviene aclarar su función, o participación, dentro de la estructura de un pavimento:

a) Sub-rasante

Ancho total de la vía que constituye la fundación para el pavimento, hombrillos y zonas de estabilización. Este término realmente es compartido en los aspectos de diseño geométrico: en ellos se refiere al plano que separa la infraestructura y superestructura del pavimento; y en el diseño de pavimentos: en el cual se refiere a los últimos centímetros del relleno o corte del movimiento de tierras, que sirven de soporte a la estructura capaz de recibir y reducir las cargas del pavimento. La sub-rasante no forma parte del pavimento, pero es una variable fundamental en su determinación.

b) Sub-base

Parte de la estructura del pavimento construida directamente sobre la sub-rasante, y que sirve de soporte a la base.

c) Base

Capa, o capas, de agregados, o de suelos o agregados tratados, destinadas a distribuir las cargas provenientes del paso de los vehículos sobre la sub-base o sub-rasante de la vía, y encima de la cual se construye la capa de rodamiento.

d) Capa de rodamiento

Capa superior del pavimento que soporta directamente el tránsito, constituida por una o más capas.

e) Tránsito (tráfico)

Vehículos de todo tipo, con sus respectivas cargas, considerados aisladamente o en conjunto, que utilizan cualquier vía.

2.2.2. Factores que influyen en el diseño

El diseño de pavimentos está conformado por dos grandes fases:

- Cuantificación del tránsito, caracterización del material de fundación y de los materiales y mezclas que serán empleados en el pavimento
- Determinación de los espesores de capas

Ambas etapas deben ser desarrolladas simultáneamente: cada una depende de la otra; los espesores resultantes serán función de las características de los materiales y mezclas empleados en su construcción, y los espesores podrán condicionar las exigencias de calidad que se impongan sobre los materiales a ser empleados en el pavimento.

2.2.3. Conceptos estructurales básicos en los pavimentos flexibles

En el caso de los pavimentos flexibles, su capacidad de soporte se debe a la forma de como se distribuyen las cargas aplicadas sobre la superficie.

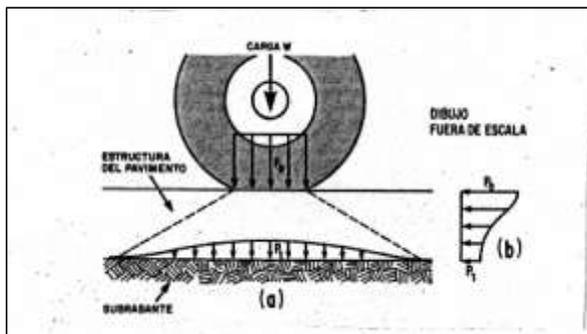
Por definición, un pavimento flexible consiste de una serie de capas con el mejor material cercano a la superficie. Como consecuencia, la carga aplicada se reduce con la profundidad. La forma como ésta varíe dependerá de las propiedades de los diferentes materiales empleados en la construcción del pavimento. La sub-rasante es, finalmente la capa que debe soportar las cargas impuestas, al igual que las capas que sobre ella serán construidas.

La Figura 2.1 muestra la carga de una rueda (W), que es transmitida a la superficie del pavimento a través del caucho del vehículo, y que resulta en una presión unitaria vertical aproximadamente uniforme, identificada como P_o . Cada capa del pavimento absorbe parte de esta presión, y distribuye la presión restante sobre la capa inferior de

tal manera que este esfuerzo se ve reducido a un valor menor al esfuerzo resistente de la capa subyacente.

La selección adecuada de los materiales y/o mezclas, y de los correspondientes espesores, resultará en que el esfuerzo aplicado sobre la sub-rasante (P1), será suficientemente pequeño para ser soportado fácilmente por el material de fundación.

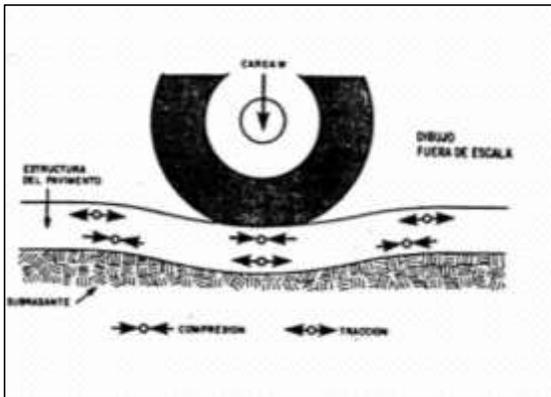
Figura 2.1 Distribución de las cargas de los neumáticos a través de la estructura de un pavimento flexible



Fuente: Apuntes de Pavimentos, Corredor Gustavo

Cada vez que un vehículo pasa sobre una sección de un pavimento, éste sufre una deformación, o deflexión, que es recuperable; es decir es una deformación elástica. La Figura 2.2, representa como la carga del vehículo (W) deforma levemente la estructura del pavimento, causando esfuerzos de tracción y compresión dentro del mismo. Las capas asfálticas tienen resistencia a la tracción y compresión para soportar los esfuerzos impuestos. Las capas granulares de sub-base y/o base sólo resisten esfuerzos de compresión.

Figura 2.2 Esfuerzos de tracción y compresión como resultado del paso de una carga sobre un pavimento flexible



Fuente: Apuntes de Pavimentos, Corredor Gustavo

2.2.4. Tipos de fallas en los pavimentos

Tal como fue establecido inicialmente, un pavimento siempre tenderá a fallar. Estas fallas pueden ser, básicamente, de dos tipos:

- **Estructural:** colapso, o rotura de uno o más de los componentes del pavimento, de una magnitud tal que lo hacen incapaz de soportar las cargas impuestas
- **Funcional:** condición del pavimento que causa incomodidad o inseguridad al conductor, o grandes esfuerzos sobre el vehículo al transitar sobre el pavimento. La falla funcional puede venir o no, acompañada de una falla estructural.

El grado de falla de un pavimento es progresivo; indudablemente, al poner una obra en servicio, no debe presentar falla alguna, pero al paso del tiempo, es decir la aplicación de las cargas y los efectos adversos de las condiciones climatológicas, van haciendo aparecer, y avanzar, las fallas.

La calificación del grado de severidad de las fallas es, por otra parte, relativamente subjetiva, es decir dependiente de la persona que realice la evaluación. Es importante, sin embargo el conocer bajo que tipo puede calificarse una falla, estructural o funcional, ya que las medidas correctivas que el ingeniero vaya a tomar, dependerán de que tipo se trate.

Las causas de las fallas, sin embargo, son comunes a ambos tipos, y pueden provenir de múltiples razones, entre ellas:

- Sobrecargas, provenientes a su vez de vehículos con cargas totales muy altas, repeticiones del paso de los camiones muy por encima de las estimaciones iniciales, y elevadas presiones de contacto entre el caucho y el pavimento, causarán la falla prematura de la estructura
- Efectos de las condiciones ambientales, que progresiva e irremediamente irán deteriorando el pavimento. Muchas de las variables climáticas pueden ser estimadas, pero sigue siendo “pobre” la certeza en la predicción de su efecto sobre los pavimentos
- Defectos en la construcción, harán que los materiales resulten con niveles de calidad menores a los supuestos en el diseño
- Variabilidad propia de los materiales, que podrá conducir también a sectores del pavimento con niveles de calidad inferiores a los deseados
- Mantenimiento inadecuado, conducirá a un desarrollo exponencial de una falla inicialmente de fácil corrección
- Mal diseño, causado por errores en la información de entrada al método, o mala aplicación o interpretación de los resultados de ensayos

Todas estas fallas pueden agruparse bajo un mismo término: subdiseño, sin que esto quiera decir que el Ingeniero realizó un trabajo profesional de bajo nivel, sino que todas las variables que actúan sobre un pavimento, que en la etapa de diseño son estimadas, pueden tener un comportamiento muy distinto, e impredecible, con el transcurrir del tiempo de trabajo del pavimento. Esta condición, muy real en nuestro país debido a la carencia de registros estadísticos permanentes y confiables, exigen del

proyectista de pavimentos, un esfuerzo mayor en el análisis de toda la información disponible, con el fin de producir un diseño que se comporte la más parecido posible a como fue conceptualizado.

2.3. 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.

En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y eventualmente el desempeño de la misma como pavimento terminado. El objetivo general para el diseño de mezclas asfálticas, es el determinar cada componente de la mezcla asfáltica, y el asfalto que resulte en una mezcla económica que tenga:

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

Existen diversos métodos de laboratorio que permiten diseñar mezclas asfálticas en caliente. Los más conocidos son:

- El Método Hubbard-Field
- El Método Triaxial de Smith
- El Método Hveem
- El Método Marshall

- El Método Superpave®
- La Metodología Ramcodes® para la interpretación de los resultados de ensayos de laboratorio de otros métodos de ensayo de mezclas, tal como el Marshall o Superpave.

Los dos primeros han entrado en desuso en los últimos años. El Método Hveem es de aplicación limitada a algunos estados de los Estados Unidos debido a la complejidad del proceso y lo costoso de los equipos. El Método Superpave®, es bastante reciente (1999), y aún cuando sus equipos son también de costo elevado, es un método fundamentalmente científico, por lo cual será el método que se empleará en los años por venir. El **Método Marshall** el más utilizado a nivel mundial, por lo simple de sus procedimientos y lo relativamente económico de sus equipos; estas características han resultado en la obtención de una extensa correlación entre los valores de ensayo de laboratorio y el comportamiento de pavimentos flexibles. El costo de un equipo de laboratorio para la correcta ejecución del ensayo Marshall es bajo en comparación, lo cual es otra razón que explica la difusión de este método de ensayo.

La metodología Ramcodes® presenta un procedimiento racional para la determinación de las características técnicas de una mezcla asfáltica, y, aun cuando no es un método de ensayo propiamente dicho, la facilidad y calidad del manejo e interpretación de resultados de ensayos de otros métodos de ensayo hace que, en la práctica, pueda ser calificado, para muchos ingenieros de pavimentos, como un nuevo “método de ensayo”.

2.3.1. Características y comportamiento de la mezcla

Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla realizada a 150°C colocada y compactada en caliente. Las cuatro características son:

2.3.1.1. Densidad de la mezcla.

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

2.3.1.2. Vacíos de aire

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional. La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla y viceversa.

2.3.1.3. Vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto. El vacío en el agregado mineral representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla. Cuanto mayor sea el vacíos en el agregado mineral, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto.

2.3.1.4. Contenido de asfalto

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios dictados por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos contenga la gradación de la mezcla, mayor será el área superficial total y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

El contenido total de asfaltos es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el 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.

2.3.2. Propiedades consideradas en el diseño

Las mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente cuyo objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclas es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades nombradas a continuación:

2.3.2.1. Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas de tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas; un pavimento inestable desarrolla ahuellamiento, ondulaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla.

2.3.2.2. Durabilidad

La durabilidad de un pavimento asfáltico es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambio en las propiedades del asfalto y separación de las películas de asfalto. Éstos resultados pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito o una combinación de ambos.

2.3.2.3. Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento asfáltico es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relacionan con impermeabilidad.

2.3.2.4. Trabajabilidad

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

2.3.2.5. Resistencia a la fatiga

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

A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga. Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito.

2.3.2.6. Resistencia al deslizamiento

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de

agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento. Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa

2.3.3. Método de Diseño Marshall

2.3.3.1. Desarrollo

Los conceptos básicos del Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas fueron formulados a finales de la década de los años 40 por el ingeniero Bruce Marshall, un experto en pavimentos asfálticos, junto con otros ingenieros del departamento de carreteras del estado de Mississippi, en los Estados Unidos. El cuerpo de ingenieros de carreteras de los Estados Unidos, a través de extensas investigaciones y estudios de correlación, lo mejoró e incorporó ciertas modificaciones al método, conduciéndolo al procedimiento actual, el cual también ha sido adoptado por la ASTM bajo la codificación ASTM D 1559: “Resistencia al Flujo de las Mezclas Asfálticas mediante el empleo del equipo Marshall”.

2.3.3.2. Aplicabilidad del método

El Método Marshall, tal como ha sido normalizado por la ASTM, es aplicable a mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico y agregados de granulometría densa o fina, con un tamaño nominal máximo de 25 mm. Se utiliza tanto para el diseño en laboratorio como para el control de mezclas elaboradas en planta. Su empleo en mezclas abiertas es de relativa conveniencia, y exige la aplicación del criterio del ingeniero para que conduzca a resultados confiables.

En los últimos años el Instituto del Asfalto (IDA) ha modificado el método original para que pueda también ser empleado en el diseño y control de mezclas en frío, preparadas con mezclas densas y asfaltos del tipo RC, o asfalto emulsificado.

2.3.3.3. Determinaciones previas

- a) Contenido inicial de cemento asfáltico
- b) Verificar los requerimientos para la granulometría

Con formato: Fuente: 12 pto, Negrita, Español (España), Sin Resaltar

- c) La densidad real seca de cada árido que participa en la mezcla y la de filler, si lo hubiere.
- d) La densidad del cemento asfáltico a 25°C.
- e) Probetas según la norma boliviana.
- f) Densidades de las probetas compactadas.
- g) Estabilidad y fluencia de las mezclas usando el equipo Marshall.

2.3.3.4. Cálculos

- a) El contenido inicial de asfalto es la concentración de masa de ligante asfáltico. Se expresa como el porcentaje de la masa total de la mezcla o como porcentaje de la masa total del agregado.

El contenido inicial de cemento asfáltico está en función de las características del material pétreo, para determinar el contenido mínimo se puede realizar por el Método del Área Superficial o Método de la SAHOP y por el Método del Instituto de Asfalto (USA).

- a. Método de la SAHOP o método del Área Superficial

Ec. 2.1 Contenido inicial de CA, Método SAHOP

$$CA = (n/100) * (0.41 G + 2.05 g + 15.38 A + 53.3 F)$$

Donde:

- CA = Porcentaje de cemento asfáltico inicial para cubrir el pétreo, respecto al peso del árido.
- g = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz ¾” y se retiene en el tamiz N°4.
- G = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 4 y se retiene en el tamiz N°40.
- A = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 40 y se retiene en el tamiz N°200.
- F = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 200
- n = Índice asfáltico

Tabla 2.1 Aparato de Marshall, mordaza

Tipo de material	n
Gravas o arenas de río o materiales redondeados de baja absorción	0.55
Gravas angulosas redondeadas, triturados de baja absorción	0.60
Gravas angulosas o redondeadas de alta absorción y rocas trituradas de absorción media	0.70
Rocas trituradas de alta absorción	0.80

Fuente: Instituto Chileno de Asfalto

b. Método del Instituto de Asfalto (USA)

Ec. 2.2 Contenido inicial de CA, método del Instituto del Asfalto (USA)

$$P = 0.032a + 0.045b + Kc + n$$

Donde:

- P = Porcentaje de cemento asfáltico estimado por peso total de la mezcla.
a = Porcentaje de agregado retenido en el tamiz N° 10.
b = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 10 y se retiene en el tamiz N°200.
c = Porcentaje de agregado que pasa sobre el tamiz N° 200
K = Factor que depende del valor de “c”, así

Tabla 2.2 Factor K, Método del Instituto del Asfalto

C	K
11-15	0.20
6-10	0.18
c < 5	0.15

Fuente: Instituto Chileno de Asfalto

Para esta evaluación de mezclas densas se utilizará el promedio aritmético de ambos métodos como el contenido inicial de cemento asfáltico de cada curva.

- c. Los requerimientos para las granulometrías están en función del tamaño máximo nominal del agregado, del tipo de mezcla y el número de ejes equivalentes. (Ver Anexo 2.1).

En esta evaluación se usarán rangos para mezclas densas, para tránsitos menores a 10^7 ejes equivalentes de 8.2 t.

- d. Cálculo de la densidad real seca ponderada de las mezcla de áridos
Cuando la mezcla está compuesta por dos o más áridos, todos con diferentes densidades reales, la densidad real se calcula de la acuerdo a la Ec.2.3

Ec. 2.3 Densidad real seca de la mezcla de áridos

$$\rho_{RS} = P_1 \cdot \rho_{RS1} + P_2 \cdot \rho_{RS2} + \dots + P_n \cdot \rho_{RSn}$$

Dónde:

- ρ_{RS} = Densidad real seca de la mezcla de agregados
 P_1, P_2, \dots, P_n = Porcentajes en peso de los áridos 1,2,...n, expresados en decimal
 $\rho_{RS1}, \rho_{RS2}, \rho_{RSn}$ = Densidades reales de los áridos 1,2,...n

- e. Cálculo de la densidad efectiva del árido. Se calcula de acuerdo a la Ec.2.4

Ec. 2.4 Densidad efectiva del árido

$$\rho_E = \frac{100}{\frac{100 + P_b}{D_{mm}} - \frac{P_b}{\rho_b}}$$

Donde:

- ρ_E = Densidad efectiva del árido (kg/m³)
 P_b = Porcentaje de asfalto referido al árido (%)
 D_{mm} = Densidad máxima de la mezcla suelta (kg/m³)
 ρ_b = Densidad del asfalto(kg/m³)

- f. Cálculo del porcentaje de asfalto absorbido.

El asfalto absorbido se expresa como un porcentaje referido al árido y se calcula con la siguiente fórmula, Ec. 2.5

Ec. 2.5 Porcentaje de asfalto absorbido

$$P_{ba} = \left(\frac{1}{\rho_{RS}} - \frac{1}{\rho_E} \right) * \rho_b * 100$$

Donde:

- P_{ba} = Porcentaje de asfalto absorbido, referido al árido (%)
- ρ_{RS} = Densidad real seca del árido(kg/m³)
- ρ_E = Densidad efectiva del árido(kg/ m³)
- ρ_b = Densidad del asfalto(kg/ m³)

g. Cálculo de la densidad máxima de la mezcla para distintos contenidos de asfalto.

Al calcular el porcentaje de huecos de aire en la mezcla, es necesario conocer D_{mm} para cada porcentaje de asfalto considerado.. Una vez obtenida la D_{mm} para un determinado contenido de asfalto y calculada la densidad efectiva del árido, se calcula la D_{mm} de la mezcla para cualquier otro porcentaje de asfalto, de acuerdo a la Ec. 2.6

Ec. 2.6 Densidad máxima de la mezcla para diferentes contenidos de asfalto

$$D_{mm} = \frac{100 + P_b}{\frac{100}{\rho_E} + \frac{P_b}{\rho_b}}$$

Donde:

- D_{mm} = Densidad máxima de la mezcla (kg/m³)
- P_b = Porcentaje de asfalto referido al árido (%)
- ρ_E = Densidad efectiva del árido(kg/m³)
- ρ_b = Densidad del asfalto(kg/m³)

h. Contenido de asfalto útil

El contenido de asfalto útil (P_{bu}) de una mezcla, corresponde al contenido de asfalto total menos el contenido de asfalto absorbido por el árido. Se calcula de acuerdo a la Ec. 2.7

Ec. 2.7 Contenido de asfalto útil

$$P_{bu} = P_b - P_{ba}$$

Donde:

- P_{bu} = Porcentaje de asfalto útil referido al árido (%)
 P_b = Porcentaje de asfalto referido al árido (%)
 P_{ba} = Porcentaje de asfalto absorbido referido al árido (%)

i. Cálculo de los Vacíos en el Árido Mineral

El porcentaje de Vacíos en el Árido Mineral (VAM), se calcula de acuerdo a la Ec 2.8

Ec. 2.8 VAM

$$VAM = 100 * \left(1 - \frac{G}{\rho_{RS}} * \frac{100}{100 + P_b} \right)$$

Donde:

- VAM = Porcentaje de vacíos en el árido mineral (%)
 G = Densidad de la mezcla compactada (kg/m³)
 P_b = Porcentaje de asfalto referido al árido (%)

j. Cálculo del porcentaje de huecos de aire en la mezcla

El porcentaje de huecos de aire en la mezcla (V_a), se calcula de acuerdo a la Ec.2.9

Ec. 2.9 V_a

$$V_a = 100 * \frac{D_{mm} - G}{D_{mm}}$$

Donde:

V_a = Porcentaje de huecos de aire en la mezcla (%)

G = Densidad de la mezcla compactada (kg/m³)

D_{mm} = Densidad máxima de la mezcla (kg/m³)

k. Cálculo del porcentaje de huecos llenos con asfalto

El porcentaje de huecos llenos con asfalto (V_{LL}), se calcula de acuerdo a la Ec.2.10

Ec. 2.10 V_{LL}

$$V_{LL} = 100 * \left(1 - \frac{V_a}{VAM}\right)$$

Donde:

V_{LL} = Porcentaje de huecos llenos con asfalto (%)

V_a = Porcentaje de huecos de aire en la mezcla (%)

VAM = Porcentaje de vacíos en el árido mineral (%)

2.3.3.5. Acondicionamiento de los datos

- a) Los valores de estabilidad obtenidos para probetas de espesores distintos a 63.5 mm deben corregirse, convirtiendo éstos a un valor equivalente a 63.5 mm, utilizando para ello los factores de corrección. (Ver Anexo 2.1)
- b) Calcular el promedio de la densidad, fluencia y estabilidad corregida, para todas las probetas con un mismo contenido de asfalto.
- c) Confeccionar los siguientes gráficos, uniendo mediante una curva suave todos los puntos obtenidos:
 - a. Estabilidad v/s porcentaje de asfalto
 - b. Fluencia v/s porcentaje de asfalto
 - c. Densidad v/s porcentaje de asfalto
 - d. Huecos en la mezcla v/s porcentaje de asfalto
 - e. VAM v/s porcentaje de asfalto

2.3.3.6. Determinación del contenido óptimo de asfalto

a) Capa de rodadura

- a. El contenido óptimo de asfalto de la mezcla se determina considerando las curvas de densidad, estabilidad y huecos en la mezcla. De dichas curvas se determinan los porcentajes de asfalto (Pb) que entreguen:

- Máxima estabilidad (Pb1)
- Máxima densidad (Pb2)
- Contenido de asfalto para un 5% de huecos (Pb3)

El contenido óptimo de asfalto se calcula como la media aritmética de los tres valores, con la Ec. 2.11

Ec. 2.11 Pb óptimo para la capa de rodadura

$$Pb \text{ óptimo} = \frac{Pb_1 + Pb_2 + Pb_3}{3}$$

- b. Verificar el contenido óptimo de asfalto, con una tolerancia de ± 0.3 puntos porcentuales, cumpla con todos los resultados exigidos a la mezcla. En caso contrario, confeccionar una nueva serie de muestras.

b) Capa de base y capa intermedia

Se selecciona como contenido el porcentaje de ligante que, con una tolerancia de ± 0.5 puntos porcentuales, cumpla con todos los requisitos de calidad exigidos a la mezcla.

2.3.3.7. Informe

El informe debe incluir lo siguiente:

a) Identificación de los materiales

Indicar procedencia, lugar y fecha de muestreo, tanto del asfalto como del árido.

b) Áridos

Indique los siguientes análisis para cada árido:

- a. Granulometría
- b. Densidad aparente suelta

- c. Densidad real seca
 - d. Densidad neta
 - e. Desgaste de los Ángeles
 - f. Índice de plasticidad
 - g. Equivalente de arena
 - h. Dosificación de áridos
 - i. Granulometría de la mezcla de áridos
- c) Asfalto
- a. Certificados de control de calidad
 - b. Densidad
- d) Mezcla árido – asfalto
- a. Densidad máxima de la mezcla
 - b. Porcentaje de asfalto absorbido referido al árido
 - c. Temperatura de mezclado
 - d. Temperatura de compactación de las probetas
- e) Análisis Marshall
- a. Para cada contenido de asfalto considerado se debe incluir:
 - Densidad
 - Huecos en la mezcla
 - Vacíos en el agregado mineral (vam)
 - Estabilidad
 - Fluencia
 - b. Gráficos de densidad, huecos, VAM, estabilidad y fluencia con respecto a cada uno de los porcentajes de asfalto considerados.
 - c. Fórmula de trabajo
Esta comprende:
 - Banda de Trabajo, con las siguientes tolerancias:

Tabla 2.3 Banda de trabajo para Método Marshall

Tamiz 4.75 mm y superiores	± 5 puntos porcentuales
----------------------------	-------------------------

Tamices 2.36mm y 1.18 mm	± 4 puntos porcentuales
Tamices 0.6 mm y 0.3 mm	± 3 puntos porcentuales
Tamiz 0.15 mm	± 2 puntos porcentuales
Tamiz 0.075 mm	± 1.5 puntos porcentuales
Contenido óptimo de asfalto para capas de rodadura	± 0.3 puntos porcentuales
Contenido óptimo de asfalto para capas de base o intermedia	± 0.5 puntos porcentuales

Fuente: Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia

2.4. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.4.1. Método para determinar la resistencia a la reformación plástica de mezclas asfálticas utilizando el aparato Marshall (AASHTO T 245-97)

Este método describe la medición de la resistencia a la deformación plástica de probetas cilíndricas de mezclas asfálticas, cargadas sobre su manto lateral, usando el aparato Marshall. Este método es aplicable a mezclas asfálticas con árido de tamaño máximo de 25 mm.

2.4.1.1. Procedimiento

- a) Para probetas confeccionadas con cementos asfálticos, coloque éstas en un baño de agua 60 ± 1 °C durante 30 a 40 min, antes de ensayar.
- b) Limpiar completamente la mordaza. La temperatura de ésta debe mantenerse entre 21 y 38 °C, usando un baño de agua si es necesario. Lubrique las barras guías con una película delgada de aceite de modo que la parte superior de la mordaza deslizar suavemente. Si se usa un anillo de prueba para medir la carga aplicada, asegurar que el dial esté firmemente ajustado y en cero.
- c) Sacar la probeta del agua y secar cuidadosamente la superficie. Colocar y centrar la probeta en la parte inferior de la mordaza, luego colocar la parte superior y centrar el conjunto en el aparato de carga.
- d) Aplicar carga a la probeta a una velocidad constante de deformación de 50 ± 1 mm/min, hasta que se produzca la falla. El punto de falla queda definido por la carga máxima obtenida. Definir la estabilidad Marshall

como el número total de Newtons (N) necesarios para producir la falla de la probeta a 60 °C, corregida de acuerdo a la tabla del Anexo 2.2.

- e) A medida que avanza el ensaye la estabilidad, sujete firmemente el medidor de flujo sobre la barra guía. Cuando se produzca la carga máxima, tomar la lectura y anotar. Esta lectura es el valor de la fluidez de la probeta expresada en unidades de 0.25 mm (1/100 pulg). El procedimiento completo, estabilidad y fluencia, comenzando desde el momento en que se retira la probeta del agua, no debe durar más de 30s.

2.4.1.2. Informe

Además de la identificación de la obra, identificación y procedencia de los materiales, el informe debe incluir lo siguiente:

- a) Carga máxima promedio (newton) de a lo menos 3 probetas, corregidas cuando sea necesario.
- b) Valor promedio de la fluidez (0.25 mm) de a lo menos 3 probetas.
- c) Temperatura de mezclado.
- d) Temperatura de compactación.

Figura 2.3 Aparato de Marshall, **Fig. 1** Molde de compactación, **Fig. 2** Martillo de compactación

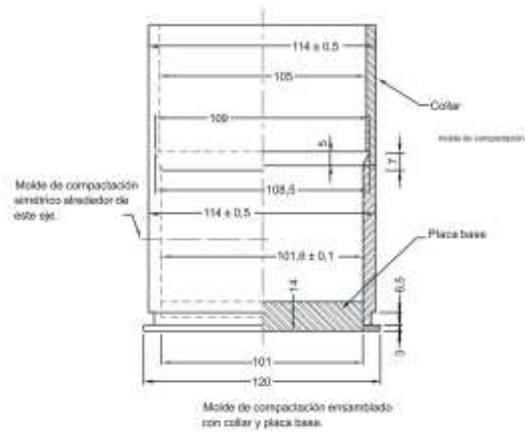


Figura 1

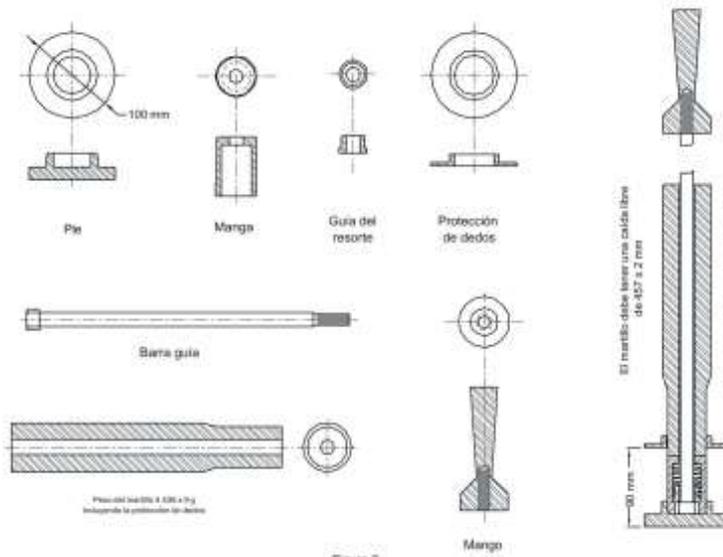
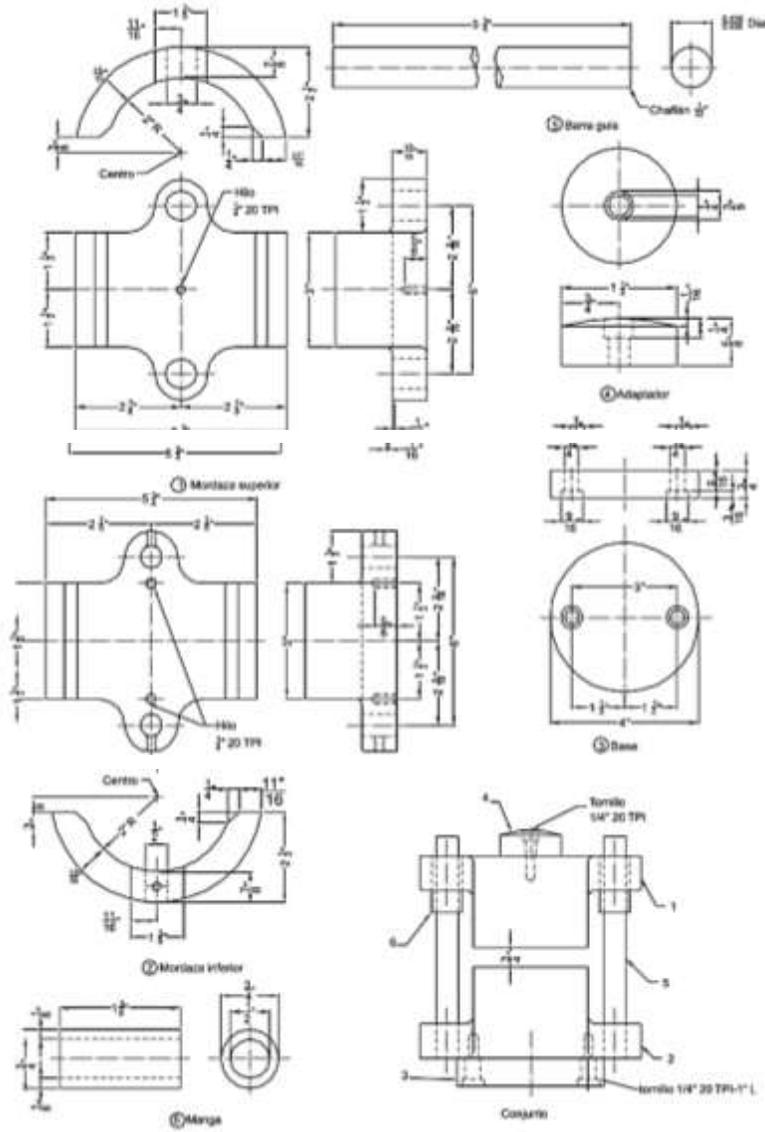


Figura 2

Fuente: Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia

Figura 2.4 Aparato de Marshall, mordaza



Fuente: Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia

2.4.2. Método para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas

Este método establece procedimientos para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas

2.4.2.1. Definiciones

a) Densidad (ρ)

Es el cociente entre la masa (m) de una sustancia y su volumen (v) a una temperatura especificada. Se expresa en kilogramos por metro cúbico (Kg/m^3)

b) Densidad real (G)

Densidad en que se considera el volumen macizo de la probeta, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles.

c) Secado hasta masa constante

Límite de secado a 50 ± 5 °C, en que dos pesadas sucesivas difieren en un porcentaje igual o inferior al 0.1 % de la menor masa determinada. La muestra debe dejarse en horno a 50 ± 5 °C durante 12 h y luego pesarse cada 2 h.

2.4.2.2. Método A: Probetas cubiertas con parafina

a) Cálculos

La densidad de la probeta está determinada a partir de la siguiente ecuación:

Ec. 2.12 Densidad real de una probeta, M. Probetas con parafina

$$G = \frac{A}{\frac{(D - E)}{\rho_w} - \frac{(D - A)}{\rho_p}} * 1000 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Donde:

- A = Masa de la probeta seca en aire (g)
- D = Masa de la probeta seca más parafina en aire (g)
- E = Masa de la probeta seca más parafina en agua (g)

ρ_p = Densidad de la parafina (25°C)±1(g/(cm³))

ρ_w = Densidad del agua (1.0 g/(cm³))

2.4.2.3. Método B: Probetas con superficie saturada seca

Ec. 2.13 Porcentaje de agua absorbida, M. Probetas con sup. seca

$$A_{ab} = \frac{B - A}{B - C} * 100$$

Si A_{ab} es mayor que 2, emplear el Método A.

a) Cálculos

Calcular la densidad de acuerdo a la siguiente fórmula:

Ec. 2.14 Densidad real de una probeta, M. Probetas con saturada seca

$$G = \frac{A}{\frac{B - C}{\rho_w}} * 1000 \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$$

Donde:

A = Masa de la probeta seca en aire (g)

B = Masa de la probeta en aire con superficie seca (g)

C = Masa de la probeta en agua (g)

ρ_w = Densidad del agua (1.0 g/(cm³))

2.5. MATERIALES ASFÁLTICOS

En obras de pavimentación se emplean diversos materiales asfálticos en riegos y sellos asfálticos, tratamientos superficiales o como cementantes en mezclas. La industria de pavimentación asfáltica cuenta con más de 100 años de experiencia, lo que ha permitido el desarrollo de numerosas técnicas con asfaltos.

2.5.2. Emulsión Asfáltica (EA):

Una combinación de cemento asfáltico, agua y un agente emulsionante. Es un sistema heterogéneo en el que el agua es la fase continua de la emulsión, y diminutos glóbulos de asfalto, cargados eléctricamente, la fase discontinua. Cuando tiene contacto con el agregado o la superficie donde se aplique la emulsión

“rompe”, o sea los glóbulos de asfalto se unen de nuevo y el agua se separa. Las EA son empleadas en riegos, tratamientos superficiales, reciclado y mezclas en frío.

2.5.3. Asfaltos líquidos:

Consisten en cemento asfáltico diluido mediante la adición de un solvente logrando un producto líquido a temperatura ambiente. Al ser expuesto al medio ambiente el solvente se evapora (proceso de curado) dejando el asfalto como residuo. Son empleados en riegos, tratamientos superficiales y mezclas en frío.

El uso de estos productos están siendo seriamente cuestionados y prohibidos en muchos países debido al efecto contaminante que producen así como por el desperdicio de importantes cantidades de solvente.

2.5.4. Cemento Asfáltico (CA):

El asfalto es un material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando) a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla en caliente.

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

En Bolivia los cementos asfálticos se clasifican por el grado de penetración, la Tabla 2.2 muestra la clasificación de los asfaltos y sus propiedades.

Tabla 2.4 Clasificación de asfaltos por grado de penetración

	Grado de penetración
--	-----------------------------

	40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Penetración a 25°C, 100g, 5s	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto inflamador, ensayo Cleveland, °C	450		450		450		425		350	
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	100		100		100		100			
Prueba de la Mancha, con:										
Solvente normal de nafta	Negativo para todos los grados									
Solvente de nafta- xileno, %xileno	Negativo para todos los grados									
Solvente de heptano- xileno, %xileno	Negativo para todos los grados									

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, Instituto Chileno del Asfalto

2.5.5. Obtención del asfalto

El diagrama del proceso para la extracción del asfalto de petróleo (Figura 2.5) muestra la circulación del petróleo crudo a través de una refinería destacándose la parte del proceso relativa a la refinación y producción del cemento asfáltico.

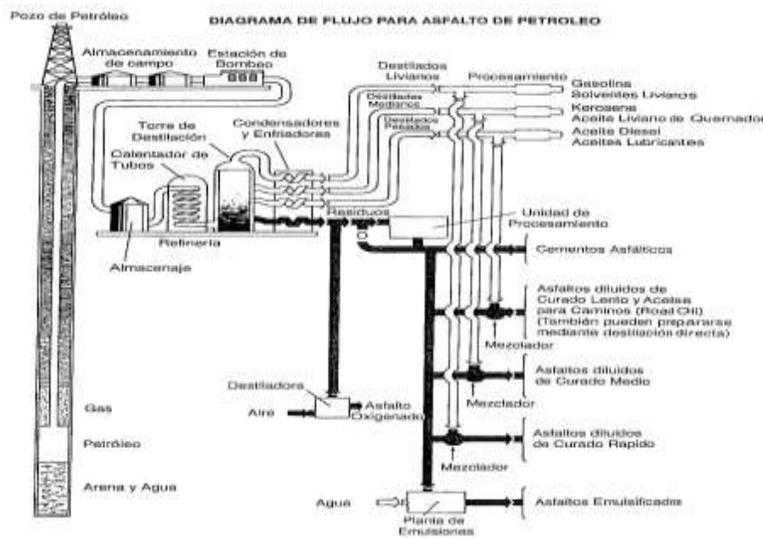
Durante el proceso de refinación, el petróleo crudo es conducido a un calentador tubular donde se eleva rápidamente su temperatura para la destilación inicial. Luego entra a una torre de destilación donde se vaporizan los componentes o fracciones más livianas (más volátiles) y se los separa para el posterior refinamiento en nafta, gasolina, querosene y otros productos derivados del petróleo.

El residuo de este proceso de destilación es la fracción pesada o petróleo crudo, comúnmente llamada crudo reducido. Puede ser usado como fuel oil residual, o procesado en distintos productos, entre ellos, el asfalto. Para la separación de la fracción asfalto del crudo reducido se puede utilizar un proceso de extracción

mediante solventes. Luego, se refina la mayor parte de esta fracción para obtener cemento asfáltico. Según el proceso de refinación utilizado, se obtienen cementos asfálticos de muy alta o baja consistencia. Estos productos se mezclan después, en cantidades adecuadas para obtener cementos asfálticos de la consistencia deseada. Los asfaltos soplados se producen insuflando aire a altas temperaturas al asfalto de consistencia apropiada.

Con respecto a las mezclas asfálticas, nos ocuparemos principalmente de las mezclas en caliente y dentro de éstas las de Cemento Asfáltico (CA) por ser las de mayor calidad debido a que usan cemento asfáltico como cementante y requieren agregados con gradación específica, de calidad controlada y alto porcentaje de trituración.

Figura 2.5 Diagrama de flujo para asfalto de petróleo



Fuente: Apuntes de Pavimentos, Corredor Gustavo

2.5.6. Propiedades del asfalto

El asfalto es un líquido viscoso constituido esencialmente por hidrocarburos o sus derivados, a continuación enlistamos algunas de sus características:

Para los estudios técnicos y la construcción se consideran deseables las siguientes propiedades o características del asfalto:

2.5.6.1. Consistencia

Se refiere a la dureza del material, la cual depende de la temperatura. A altas temperaturas se considera el concepto de viscosidad para definirla.

Si el cemento asfáltico se expone al aire en películas delgadas, y se somete a un calentamiento prolongado, como por ejemplo durante el mezclado con el agregado, el asfalto tiende a endurecerse, a aumentar de consistencia. El aumento de esta característica es limitado, por lo tanto, un control no adecuado de la temperatura y del mezclado puede provocar mayor daño al cemento asfáltico por endurecimiento que por muchos años de servicio en el camino terminado.

Comúnmente, para especificar y medir la consistencia de un asfalto para pavimento, se usan ensayos de viscosidad o ensayos de penetración.

2.5.6.2. Durabilidad

Es la capacidad para mantener sus propiedades con el paso del tiempo y la acción de agentes envejecedores.

Es juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto. Esto debido a que el comportamiento del pavimento es afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción y otras variables que incluyen la misma durabilidad del asfalto.

2.5.6.3. Susceptibilidad térmica

Es el cambio que experimenta el asfalto en sus propiedades por efecto de la temperatura.

El asfalto es un material termoplástico, se vuelve más viscoso (duro) a medida que su temperatura disminuye y menos viscoso (blando) conforme su temperatura aumenta. Esta característica es conocida como susceptibilidad a la temperatura. La susceptibilidad térmica varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aun si estos tienen el mismo grado de consistencia.

Su importancia radica en que el asfalto debe tener suficiente fluidez a temperaturas altas para que pueda cubrir las partículas del agregado durante el mezclado y así permitir que estas se desplacen unas con respecto de otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficientemente viscoso, a temperatura ambiente normal para mantener unidas las partículas del agregado.

2.5.6.4. Pureza

El cemento asfáltico se compone, casi enteramente, de betunes, los cuales, por definición son solubles en bisulfuro de carbono. Los asfaltos refinados son, generalmente, más de 99.5 % solubles en bisulfuro de carbono y por lo tanto casi betunes puros. Las impurezas, si las hay, son inertes.

Normalmente, el cemento asfáltico, cuando deja la refinería, está libre de agua o humedad, pero puede haber humedad en los tanques de transporte. Si hay agua inadvertida, puede causar un asfalto espumoso cuando se calienta por encima de los 100°C.

2.5.6.5. Seguridad

Capacidad de manejar el asfalto a altas temperaturas sin peligros de inflamación. Si se somete el cemento asfáltico a temperaturas suficientemente elevadas, despiden vapores que arden en presencia de una chispa o una llama. La temperatura a la que esto ocurre es más elevada que la temperatura que normalmente es usada en las operaciones de pavimentación. Sin embargo, para fines de transporte y almacenamiento, se suele diluir el asfalto a temperaturas en las que adquiere la suficiente fluidez para bombearlo; este proceso puede generar vapores volátiles altamente riesgosos, por eso es necesario tener la certeza de que existe un adecuado

margen de seguridad. Por este motivo se hace indispensable conocer el punto de inflamación del asfalto.

2.5.7. Ensayos de caracterización del cemento asfáltico convencional

La norma de calidad de los asfaltos considera distintos ensayos para clasificar la calidad del producto, los más importantes son:

2.5.7.1. Ensayo de penetración (ASTM D5 AASHTO T49-97)

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

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

Consiste en calentar un recipiente con cemento asfáltico a una temperatura de referencia, 25°C, en un baño de agua a temperatura controlada. Se apoya una aguja normalizada de 100 gramos de peso sobre la superficie del cemento asfáltico durante 5 segundos.

Ocasionalmente, el ensayo de penetración se realiza a distinta temperatura en cuyo caso puede variarse la carga de la aguja, el tiempo de penetración o ambos.

2.5.7.2. Ensayo del punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 AASHTO T53-96)

Para obras de ingeniería se requiere que los materiales a utilizar cumplan ciertos requisitos de calidad y tengan ciertas propiedades químicas y mecánicas; es por esto que se debe determinar las condiciones a las cuales los materiales pierden o cambian estas características y para el asfalto que es un material bituminoso es preciso determinar a qué temperatura comienza a fluir.

El punto de ablandamiento es útil en la clasificación de betunes, como un elemento que establece la uniformidad de embarques o fuentes de suministro, y es indicativo de la tendencia del material a fluir en temperaturas elevadas encontradas en servicio.

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

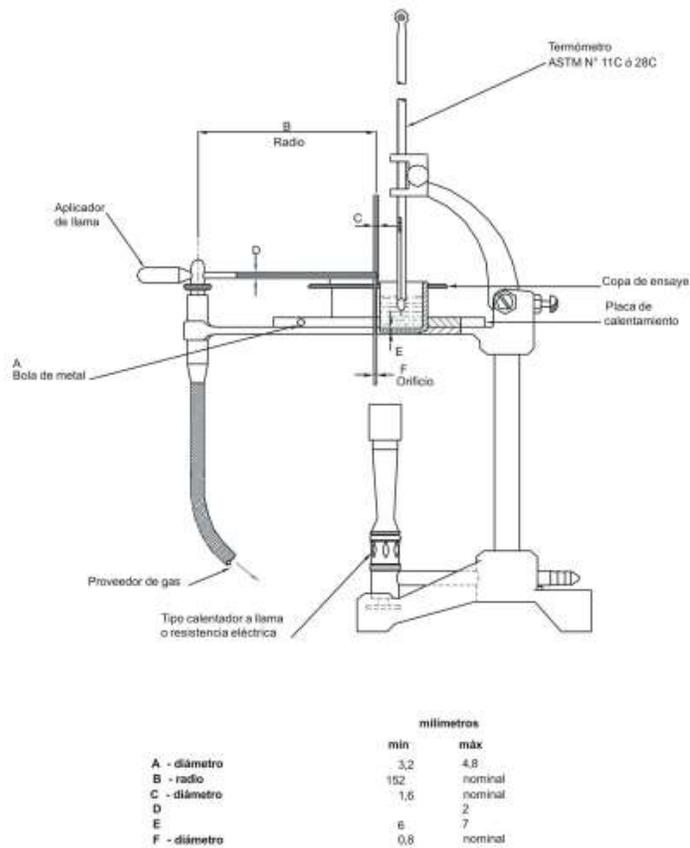
del aparato de anillo y bola sumergido en agua destilada, glicerina USP o glicol del etileno.

2.5.7.3. Ensaye para determinar los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01 AASHTO T79.96)

Cuando se calienta el asfalto, libera vapores que son combustibles. El punto de inflamación, es la temperatura a la cual puede ser calentado con seguridad un asfalto, sin que se produzca la inflamación instantánea de los vapores liberados, en presencia de una llama libre. Esta temperatura, está sin embargo, muy por debajo de la temperatura en la que el material entra en estado de combustión permanente. Se la denomina punto de combustión y es muy raro que se use en especificaciones para asfalto.

El método define la determinación de los puntos de inflamación y combustión por medio de la copa abierta de Cleveland (Figura 2.6), para productos de petróleo y otros líquidos, excepto aceites combustibles y materiales que tienen un punto de inflamación por debajo de 79°C determinado por medio de este ensaye, que consiste en llenar un vaso de bronce con un determinado volumen de asfalto y calentarlo con un aumento de temperatura normalizado. Se pasa una pequeña llama sobre la superficie del asfalto a intervalos de tiempo estipulados. El punto de inflamación es la temperatura a la cual se han desprendido suficientes vapores volátiles como para provocar una inflamación instantánea

Figura 2.6 Copa abierta de Cleveland



Fuente: Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia

2.5.7.4. Método para determinar la ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T51-00)

La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga (elonga) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, confeccionada con una muestra y de forma descrita en 1 se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas. A menos que otra condición se especifique, el ensaye se efectúa a una

temperatura de $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ y a una velocidad de $5 \text{ cm/min} \pm 5\%$. Para otras temperaturas deberá especificarse la velocidad.

Figura 2.7 Fig. 1 Molde para ductilidad de muestra de ensaye, Fig. 2 Molde para ensaye de ductilidad

Figura 1.

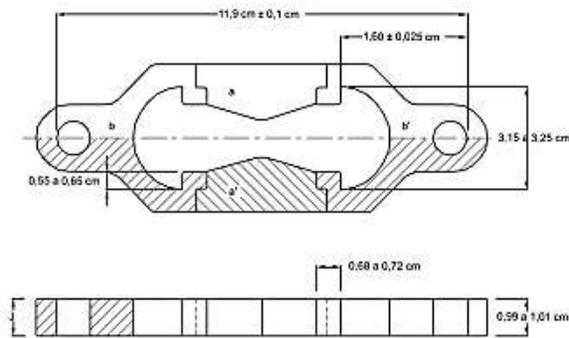
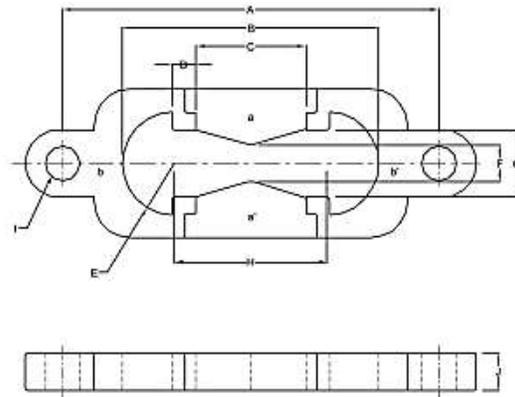


Figura 2.



Fuente: Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia

2.5.7.5. Método para determinar la densidad (ASTM D71-94 AASHTO T 229-97)

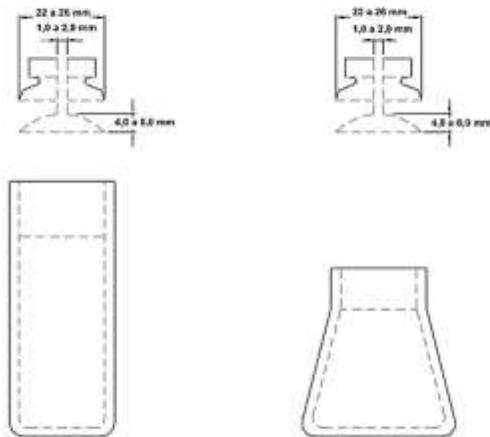
Este método establece el procedimiento para determinar la densidad de los asfaltos, mediante el uso de picnómetro a la temperatura requerida.

Este método cubre la determinación de la gravedad específica de materiales bituminosos sema-sólidos, cementos del asfalto, y los alquitranes suaves por uso de un picnómetro.

Es útil para hacer las correcciones de volumen cuando este se mide a temperaturas elevadas. Se emplea como uno de los factores para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas.

La gravedad específica de materiales bituminosos sema-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.

Figura 2.8 Picnómetros



Fuente: Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia

2.5.8. Requerimientos para el cemento asfáltico

Los requerimientos de calidad para el cemento asfáltico se pueden resumir en la siguiente tabla:

Tabla 2.5 Requerimientos de calidad para cemento asfáltico de acuerdo al grado de penetración

	Grado de Penetración									
	40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Penetración a 25°C, 100g, 5 segundos	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto Inflamador, Ensayo Cleveland, °C	450	-	450	-	450	-	425	-	350	-
Ductilidad a 25°C, 5 cm por min, cm	100	-	100	-	100	-	100	-	-	-
Prueba de la Mancha (cuando y como se especifique) con:										
Solvente normal de nafta	Negativo para todos los grados									
Solvente de nafta-xileno, %xileno	Negativo para todos los grados									
Solvente de heptano-xileno, %xileno	Negativo para todos los grados									

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente

2.6. MATERIALES PÉTREOS

El agregado es cualquier material mineral, en forma de partículas, granos o fragmentos que, adecuadamente proporcionados en diferentes tamaños, conforman una mezcla asfáltica. Los agregados convencionales son las arenas –simplemente coladas o lavadas–, las gravas de río, naturales por tener sus granos redondeados al ser producto del tamizado del material del banco, o angulares por ser trituradas; y los provenientes de canteras, como las calizas y los granitos, cuyos granos son siempre producto de la trituración y cernido del material obtenido de la voladura de los bancos; y las escorias de acería. Los agregados conforman aproximadamente entre el 90 y 95% del total en peso de la mezcla y sus características físicas y mecánicas son muy importantes ya que la resistencia total de la mezcla depende fundamentalmente del aporte de los granos.

Los agregados en mezclas asfálticas, tanto en su calidad y gradación constituyen un valor importante en las propiedades de estas. Se debe elegir cuidadosamente el tipo de agregado, ya que sus propiedades varían según el lugar de producción.

2.6.2. Origen de los materiales granulares

Los agregados minerales provienen de las rocas, ya sean sedimentarias, metamórficas o ígneas.

2.6.2.1. Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias se forman por la acumulación de sedimentos a medida que el agua se deposita. Los sedimentos pueden ser de origen mineral, como las gravas, las areniscas y las arcillas; de residuos de productos orgánicos, como las calizas y carbones; ser el producto de una reacción química o evaporación, como la sal y el yeso; o de la combinación de cualquiera de estos diferentes tipos de materiales. Las rocas sedimentarias se forman normalmente en capas o estratos, como consecuencia del proceso de sedimentación de los materiales en el fondo de antiguos lagos o mares. Las rocas sedimentarias más comunes son las areniscas y las gravas de río, que contienen un alto contenido de sílice, y son, por esta razón, llamados

“agregados silicios”. Otras rocas sedimentarias muy frecuentes contienen altos contenidos de carbonato de calcio, son denominadas “calcáreas” y las más común entre estas son las calizas.

2.6.2.2. Rocas ígneas

Las rocas ígneas provienen del material fundido (magma) formado en los volcanes y que se ha enfriado y endurecido. Las rocas ígneas pueden ser “extrusivas” si se han formado del magma arrojado fuera de un volcán sobre la superficie terrestre. Estas rocas tienen una apariencia y estructura vidriosa (de grano fino) debido a su enfriamiento violento al ser expuesto a la atmósfera; el basalto y la andesita son ejemplos de rocas extrusivas. El otro tipo de roca ígnea es llamado “intrusiva” ya que se forma del enfriamiento lento del magma que ha quedado atrapado en las profundidades de la corteza terrestre y que posteriormente, debido a movimientos de la corteza terrestre y a procesos de erosión son llevadas a la superficie; su apariencia y estructura es cristalina (de grano grueso). El granito y el gabro son ejemplos de rocas intrusivas. Los agregados para mezclas asfálticas

2.6.2.3. Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas son rocas sedimentarias o ígneas que han sido transformadas por procesos de intenso calor y presión, o por reacciones químicas. Muchos tipos de rocas metamórficas presentan como característica el que sus minerales están alineados en capas o planos paralelos, y son denominadas como “de estructura foliada”; las más comunes son los gneis, las pizarras y los esquistos. Las rocas metamórficas de estructura no paralela son “no foliadas”, siendo buenos ejemplos la cuarcita, el mármol y la serpentina.

2.6.3. Tipos de agregados para mezclas asfálticas

De acuerdo a los procesos de cómo son producidos, los agregados para mezclas asfálticas se clasifican como: naturales, procesados o sintéticos.

2.6.3.1. Agregados naturales

Son aquellos que se emplean tal como han sido obtenidos de los saques o préstamos, sin ningún otro procesamiento que la eliminación del “sobre-tamaño”. Los más comunes son de origen sedimentario, como las arenas y gravas de río; sus granos son redondeados y de textura lisa como consecuencia de la acción de roce entre los propios granos a medida que han sido transportados desde el sitio de deslave hasta el sitio de sedimentación. Su único procesamiento en obra es el cernido (tamizado) para la eliminación de los fragmentos de tamaño mayor a 1,5 pulgadas. Su ventaja radica en su bajo costo, pero pueden presentar un alto grado de variabilidad granulométrica. La resistencia mecánica de las mezclas elaboradas con agregados 100% naturales puede ser baja.

2.6.3.2. Agregados procesados

Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y cernidos con el fin de modificar su forma, tamaño y distribución granulométrica, y en un menor grado, su textura. También pueden ser lavados para mejorar su limpieza. Las fuentes más comunes de agregados procesados son las gravas de río y los materiales de cantera. Son más costosos que los agregados naturales, pero las mezclas que se elaboran con estos agregados resultan con propiedades mecánicas y volumétricas superiores. Normalmente, como resultado de la trituración y cernido se obtienen agregados con diferentes estructuras granulométricas, que deben ser combinados para lograr una distribución de tamaños que satisfaga una especificación determinada.

2.6.3.3. Agregados sintéticos o artificiales

Son agregados que no existen en la naturaleza y se obtienen como producto del procesamiento físico o químico de otros materiales. Algunos son el subproducto de procesos industriales como el refinamiento de metales: la escoria de acería o agregado siderúrgico es un material secundario (de desecho) no metálico que se obtiene en la cadena de elaboración de acero. Los agregados para mezclas asfálticas material fundido de descarte (escoria) es vertido en unas grandes copas y transportado a un patio, en donde es descargado y enfriado violentamente

mediante chorros de agua, en un proceso conocido como “trituration por agua”. El material al enfriarse produce granos de diferentes tamaños que requieren solamente su tamizado antes de ser llevados a una planta de asfalto.

2.6.4. Características físicas deseables en los agregados para mezclas asfálticas

Independientemente del tipo de mezcla asfáltica, las siguientes propiedades físicas son deseables en los agregados que la constituyen:

2.6.4.1. Los agregados para mezclas asfálticas

Tipos de granulometrías

De acuerdo con sus características granulométricas los materiales pueden clasificarse en: densamente gradados, de granulometría abierta, de granulometría discontinua, y de tamaño uniforme.

a) Densamente gradados:

Son agregados que contienen cantidades adecuadas de todos los tamaños, de grueso a fino, incluyendo filler, proporcionados de tal forma de obtener una mezcla densa con pocos vacíos. Las mezclas densamente gradadas tienen un gran número de puntos de contacto entre las partículas, que puede dar una alta resistencia friccional y reducir la posibilidad de trituration de las partículas en los puntos de contacto. Como el contenido de vacíos es bajo son poco permeables.

b) Granulometrías abiertas:

Son materiales con una gradación incompleta, que contienen menos finos que las densas. El número de punto de contactos es menor que en éstas y por ello los esfuerzos entre partículas son superiores.

c) Granulometrías discontinuas (Skip-Graded):

Son agregados que presentan discontinuidades o saltos en su gradación.

d) Granulometrías uniformes:

Estos materiales están constituidos por agregados de prácticamente un tamaño único; y son generalmente utilizados en macadam, sellos y tratamientos superficiales, pero no en mezclas asfálticas.

2.6.4.2. Resistencia y durabilidad

Los agregados deben ser lo suficientemente estables ante los efectos impuestos por el manipuleo durante su paso a través de la planta de asfalto que producen choques entre granos y de granos con componentes metálicos de la planta, y procesos de compactación en las etapas de construcción, y ante los esfuerzos impuestos por las cargas en el período de acción bajo el tráfico. Estos efectos y esfuerzos tienden a triturar y degradar las partículas, y la habilidad de un material para mantener su granulometría original ante ellos, se define como su **resistencia**.

Los ensayos que se utilizan para medir la resistencia de los agregados a estos efectos y esfuerzos son el de desgaste Los Ángeles (DLA).

La resistencia de un material depende no sólo del tipo de mezcla en la cual vaya a ser utilizado, sino de la posición de esa mezcla dentro de la estructura total del pavimento: una mezcla de rodamiento deberá exigir los mejores materiales, que la misma granulometría en una mezcla intermedia.

a) Durabilidad

Los agregados deben ser resistentes a la disgregabilidad, es decir a la acción química que produce la rotura y degradación de las partículas, lo cual normalmente se produce, y acelera, en la eventual presencia de aguas básicas o sulfatadas.

El efecto de la disgregación es menos severo en mezclas asfálticas que en agregados no tratados, ya que la película de ligante protege al agregado y minimiza el proceso. Por otra parte, se debe ser más estricto en las mezclas expuestas a la acción directa del agua (mezclas de rodamiento), que a las mezclas que no lo están (intermedias o de base).

La durabilidad de los materiales se evalúa, por el ensayo de disgregabilidad al sulfato de magnesio (ASTM C88). Con el método de ensayo de los sulfatos también se evalúa la resistencia de los agregados a los efectos del proceso de “congelado-descongelado”, en cuanto a la aplicabilidad de los límites establecidos en este ensayo, ya que fueron fijados en base a la experiencia en los Estados Unidos, con un clima muy distinto a los nuestros.

2.6.4.3. Forma de las partículas

La estabilidad de las mezclas depende, en un grado muy alto, de la trabazón de los agregados. Las mayores estabilidades se alcanzan cuando las partículas tienen forma cúbica u octaédrica, es decir “angular”, debido a que oponen mayor resistencia a su desplazamiento ante el efecto de una carga. En las mezclas con granulometrías continuas, con agregados gruesos y finos, la angularidad de las partículas finas es más importante que la de los gruesos, debido al mayor número de “puntos de contacto” que logran la trabazón.

a) Angularidad de la fracción gruesa

Las partículas alargadas o planas son indeseables, ya que aún cuando resisten al manipuleo, tienden a romperse y a degradarse bajo los efectos de la compactación y del tráfico; por esta razón las normas venezolanas limitan su contenido a porcentajes bajos.

Los agregados con partículas de forma redondeada son de más fácil compactación, con lo cual se logran, aparentemente, mayores zonas de contacto entre los granos del agregado y una buena estabilidad, pero debido a su redondez, y menor fricción entre las superficies por su escasa rugosidad, son muy susceptibles a “rodar” o desplazarse al ser sometidas al tráfico, es decir a largo plazo tienden a deformarse. Las mezclas elaboradas con agregados redondeados, por otra parte, sufren los efectos de compactación posterior bajo el tráfico, lo cual puede ocasionar exudación y reducción de la capacidad soporte de la mezcla. Las mezclas de gravas no trituradas (bases asfálticas en

caliente), requieren de un control muy cuidadoso en cuanto a su granulometría y contenido de ligante asfáltico, debido a que sus propiedades (estabilidad, flujo) son muy sensibles a las variaciones de estos parámetros.

b) Angularidad de la fracción fina

En los últimos años se ha incorporado el criterio de medición de la angularidad de los finos, lo cual se realiza siguiendo el método de ensayo propuesto por la ASTM bajo el número C-1252, y el cual ha sido adoptado dentro de la “Norma Superpave”. El exigir que los finos sean de forma angular asegura un alto grado de fricción interna del agregado fino y permite una mejor resistencia al ahuellamiento. La angularidad de los finos se define como el porcentaje de vacíos de aire presente en las partículas menores a los 2.36 mm (tamiz #8) cuando están levemente compactados; mientras mayor sea el contenido de aire mayor será la angularidad de los finos, debido a que las partículas finas angulares no se deslizan sobre otras con facilidad, dejando, en consecuencia, mayor espacio libre entre ellas. El ensayo, ilustrado en la Figura 5, consiste en dejar caer, una cantidad del agregado Pasante el tamiz #8, con una granulometría especificada, desde un recipiente ubicado a una altura determinada hasta un cilindro de volumen conocido (V), generalmente 100 cc. Conocido el peso de material (W) que ha quedado dentro del cilindro, y su gravedad específica Bulk (G_{sb}) se determina la angularidad de los finos (a) a partir de la siguiente relación:

Ec. 2.15 Angularidad de finos

$$a = \{(V - W/G_{sb})\} * 100$$

Donde:

- a = Angularidad de finos
- V = Volumen
- W = Peso
- G_{sb} = Gravedad específica Bulk

2.6.4.4. Textura superficial

Se considera que la textura superficial (rugosidad) de los agregados es el principal contribuyente en la resistencia de las mezclas asfálticas a su deformación, llamada estabilidad, debido a la fricción que se desarrolla entre las diversas partículas como consecuencia del grado de textura que presentan los granos. La textura es más importante que la angularidad del agregado en la estabilidad de una mezcla, lo cual se atribuye a que entre las partículas, más que “puntos de contacto” existen “zonas de contacto”, y por ello, mientras más rugosa es su superficie más difícil es el desplazamiento de una sobre otra. Adicionalmente, una superficie pulida presenta poca habilidad para mantener la película de asfalto adherida al agregado.

Cuando una grava se tritura, alcanza una mayor estabilidad, no sólo por la angularidad que se logra en las partículas, sino por la microrugosidad que tienen las caras fracturadas, ya que ellas no han sido sometidas al proceso de arrastre, que no produce otra cosa que la pulimentación de la superficie de las partículas.

2.6.4.5. Porosidad

La porosidad, en mezclas asfálticas, se define como la propiedad de absorción de asfalto que tienen los agregados. Es conveniente que estos agregados sean algo porosos, para que el asfalto “penetre” dentro de él y se adhiera mecánicamente a cada partícula, lo cual ayuda a evitar el desplazamiento de la película de asfalto que se forma entre las diversas partículas de agregado ante el efecto de las cargas, y a la pérdida de ella ante la presencia y efecto del agua. Los agregados muy porosos, sin embargo, al absorber mucho asfalto, requieren contenidos muy elevados de ligante para mantener su contenido efectivo, lo cual puede resultar antieconómico. En ellos puede ocurrir, por otra parte, una “absorción selectiva”, proceso a través del cual penetran en el agregado gran parte de los aceites constituyentes del asfalto y se deje en la superficie del agregado un residuo duro, de poca flexibilidad y adherencia, y se puede producir la disgregación prematura de la mezcla.

2.6.4.6. Adherencia

La adherencia es la propiedad de un agregado para mantener sobre él la película de asfalto añadida. Depende no sólo del agregado, de su textura y composición química, sino en parte muy importante, del asfalto en sí. Para que una mezcla sea durable, debe existir una buena adherencia entre el agregado y el asfalto, para que se evite la separación de la película de asfalto en presencia de agua.

Los materiales hidrófobos, aquellos que repelen la humedad, son los que mejor adherencia tienen con el asfalto, y son de naturaleza básica, como las calizas. Los agregados hidrofílicos, o que presentan afinidad por el agua, son de naturaleza ácida, dentro de los cuales destacan los materiales silíceos (gravas de río), y presentan mayor facilidad para la separación del material y el asfalto. La adherencia puede mejorarse mediante el empleo de productos químicos, o con la adición de cal hidratada a la mezcla, en porcentajes entre 0,5% y 1,0% del peso total de la mezcla. Estas son soluciones técnicamente adecuadas pero normalmente muy costosas o imprácticas.

2.6.4.7. Limpieza

Los agregados gruesos (que en mezclas asfálticas se definen como los retenidos en el tamiz #8) deben estar limpios, sin partículas de polvo o arcillas que los recubran, ya que esto afecta negativamente la efectiva adherencia del asfalto.

Aun cuando no está normalizado, debiera ser aplicado el ensayo que se emplea en Argentina y conocido "Ensayo de polvo adherido" y el cual ha sido normalizado bajo el número VN-E-68-75. Diseñado en principio para tratamientos superficiales, en la actualidad también se lo está empleando para mezclas en caliente en capas de rodamiento.

Este ensayo consiste básicamente en tamizar una muestra entre los tamices 3/8" - N°4 hasta obtener 500 gr de muestra retenida en el tamiz N°4. Se seca hasta peso constante, se colocan 200 gr en un vaso precipitado y se agrega 100 ml de agua destilada. Esto se deja en reposo durante 2 horas. Luego se agita con una espátula a razón de 60 vueltas por minuto durante 5 minutos, manteniendo inclinado el vaso unos 30°

aproximadamente. Inmediatamente después se vierte el contenido del vaso dentro del tubo de asentamiento graduado hasta alcanzar los 50 ml. Se le agrega 1 ml de una solución de sulfato de aluminio al 2%, se agita con un agitador de alambre en espiral para asegurar un mezclado perfecto con el floculante, y se deja reposar durante 24 horas. El volumen del sedimento leído a las 24 horas, indica directamente la cantidad de polvo adherido correspondiente a 100 gr del agregado.

El agregado fino (definido en las mezclas asfálticas como la fracción pasa el tamiz #8 y retenida en el tamiz #200), y la fracción pasa el tamiz #200, no deben contener cantidades perjudiciales de arcillas, o de tamaños excesivamente pequeños.

Este requisito se controla mediante el ensayo de equivalente de arena, cuya ejecución es un requisito conveniente si se quiere obtener una mezcla asfáltica adecuada. La Figura 2.7 ilustra este ensayo, normalizado por la ASTM bajo el código D2419, y el cual consiste en lavar, dentro de un tubo de diámetro y altura normalizada, la fracción Pasa # 4 con un tubo irrigador, empleando agua a la cual se le ha añadido un material anti-floculante para facilitar el mantener en suspensión a la fracción mas fina del material bajo ensayo.

2.6.4.8. Gravedad específica (peso específico)

La gravedad específica (Gs) se define como la relación entre el peso de un volumen de una cantidad determinada de agregados y el peso de un volumen igual de agua. Este valor se emplea en los cálculos volumétricos de una mezcla asfáltica y en la corrección de la combinación granulométrica de la mezcla de varios agregados, en el caso de que las diferencias de Gs y otro sea mayor de 0.20.

En las mezclas asfálticas se emplean tres (3) tipos diferentes de Gravedades

Gravedad específica Bulk (o masiva) = Gsb

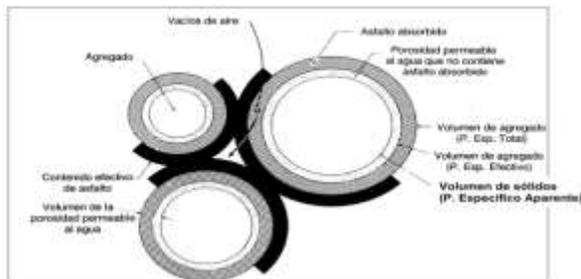
Gravedad específica aparente = Gsa

Gravedad específica efectiva = Gse

De acuerdo a lo indicado en la Figura 2.9, el volumen empleado en el cálculo de Gsb incluye el volumen total de agregados, que es igual a la suma del volumen de sólidos

mas el volumen de la porosidad permeable al agua. Por ser este el mayor volumen que puede ser considerado, es llamado “volumen Bulk” y el valor de G_{sb} es el menor de las tres gravedades específicas que se emplean en el diseño de mezclas.

Figura 2.9 Tipos de gravedad específica de un agregado



Fuente: Apuntes de Pavimentos, Corredor Gustavo

La gravedad específica absoluta (G_{sa}) se calcula empleando solo el volumen de sólidos, llamado “volumen aparente” por lo cual resulta mayor a G_{sb} .

La gravedad específica efectiva (G_{se}) se calcula empleando el volumen de sólidos mas el volumen de la porosidad permeable al agua que no contiene asfalto absorbido. El valor de G_{se} es, por lo tanto, mayor que G_{sb} pero menor a G_{sa} , ya que considera un volumen que esta comprendido entre el volumen Bulk y el volumen aparente, y es llamado “volumen efectivo”.

En los cálculos volumétricos asociados con los agregados se emplea también la gravedad específica saturada superficie seca (G_{sss}), pero este valor no se emplea en las mezclas asfálticas en caliente ya que los agregados son secados y calentados tanto en laboratorio como en planta en caliente, por lo cual pierden toda la humedad.

2.6.4.9. Economía

Un último aspecto que no debe ser dejado de lado se refiere a la economía de los agregados, en el sentido de que, aun cuando supeditado a los requisitos de calidad, debe considerarse el empleo de los materiales más económicos. Así, por ejemplo, si varios

materiales satisfacen los requisitos de calidad, deben emplearse aquéllos de menor costo.

2.6.5. Ensayos de caracterización de agregados pétreos

La norma de calidad de los agregados considera distintos ensayos para clasificar la calidad del producto, los más importantes son:

2.6.5.1. Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422 AASHTO T88)

Este método consiste en el tamizado por vía seca, el procedimiento es de agitar una cantidad pesada de áridos perfectamente secos sobre una serie de tamices con aberturas cuadradas. Los tamices están unidos de forma que el de mayor abertura está en la parte superior y los de abertura más pequeña están situados debajo. Bajo el último tamiz se coloca una bandeja que recoge todo el material que pasa a través de él. La agitación se aplica normalmente con aparatos automáticos, pero si no se disponen de estos se puede realizar manualmente sin pérdida de áridos.

Se determina el peso de material retenido en cada tamiz y se expresa en porcentaje del peso de la muestra original.

Usualmente resulta conveniente anotar estos datos en un gráfico. En estos gráficos debe indicarse el porcentaje total, el peso que pasa por cada tamiz. Las curvas así obtenidas son instrumentos que dan rápidamente idea de las características granulométricas de los áridos.

Tabla 2.6 Serie de tamices

Tamaños nominales de abertura	
(mm)	ASTM
75	3"
63	2 1/2"
50	2"
37.50	1 1/2"
25.00	1"
19.00	3/4"
9.50	3/8"

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Español (España)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Español (España)

Con formato: Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Automático

4.75	N°4
2	N°10
0.425	N°40
0.075	N°200

Fuente: Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia

2.6.5.2. Determinación del límite líquido de los suelos (ASTM D4318 AASHTO T89)

Este método establece el procedimiento para determinar el límite líquido de los suelos, mediante la máquina de Casagrande.

El límite líquido, es la humedad, expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remodelado en el límite entre los estados líquido y plástico. Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeada, depositada en la taza de bronce de la máquina Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, fluya y entren en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes.

De acuerdo a su plasticidad se clasifican en:

- Suelos de alta plasticidad: ≥ 24 h
- Suelos de plasticidad media: ≥ 12 h
- Suelos de baja plasticidad: ≥ 1 h

2.6.5.3. Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D431 AASHTO T90)

Este método establece el procedimiento para determinar el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos.

El límite plástico es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plásticos y semisólido. Corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3 mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0.5 a 1 cm de largo y no puedan ser reamados ni reconstituidos.

Ec. 2.16 Índice de plasticidad

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP = Índice de Plasticidad del suelo (%)

LL = Límite Líquido del suelo (%)

LP = Límite Plástico del suelo (%)

- a) Cuando no se pueda determinar uno de los dos límites, o la diferencia resulte negativa, informar el índice de plasticidad NP (no plástico).
- b) Calcular el Índice Líquido (IL) del suelo de acuerdo con la fórmula siguiente:

Ec. 2.17 Índice líquido

$$IL = \frac{w - LP}{IP}$$

Donde:

IL = Índice Líquido del suelo (%)

w = Humedad natural del suelo (%)

LP = Límite Plástico del suelo (%)

IP = Índice de plasticidad del suelo (%)

- c) Calcular el Índice de Consistencia (IC) del suelo de acuerdo con la fórmula siguiente:

Ec. 2.18 Índice de consistencia

$$IC = \frac{LL - w}{IP}$$

Donde:

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Español (España)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Español (España)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Español (España)

Con formato: Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Automático

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Español (España)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Español (España)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Español (España)

Con formato: Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Automático

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Español (España)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Español (España)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Español (España)

Con formato: Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Automático

- IC = Índice de Consistencia del suelo (%)
w = Humedad natural del suelo (%)
LL = Límite Líquido del suelo (%)
IP = Índice de plasticidad del suelo (%)

2.6.5.4. Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM E 127 AASHTO T85-91)

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

Usualmente se determina el peso específico de los áridos por dos razones:

- Para determinar el cálculo de los huecos de las mezclas asfálticas compactadas.
- Para corregir las cantidades de áridos empleado en una mezcla para pavimentación cuando su peso específico varía apreciablemente.

Es aplicable a los áridos gruesos de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, que se emplean en el análisis de suelos, elaboración de hormigones y obras asfálticas.

a) Árido grueso

Material árido retenido en el tamiz de 4.75 mm (N°4) en el caso de suelos y hormigones, y en el tamiz de 2.36 mm (N°8) cuando se utiliza en asfaltos.

b) Huecos

Espacios vacíos entre las partículas de un material árido.

c) Poros

Espacios vacíos interiores de una partícula de material árido

- a. Poro accesible: poro permeable o abierto.
- b. Poro inaccesible: poro impermeable o cerrado.

d) Densidad (ρ)

Es el cociente entre la masa (m) y el volumen (v) de un material pétreo a una temperatura especificada. Se expresa en kg/m³.

- a. Densidad real (ρ_R), es en la que se considera el volumen macizo de las partículas de material árido, más el volumen de los poros accesibles a inaccesibles de esas partículas.
- Densidad real del árido seco (ρ_{RS}), en la que se considera solamente la masa del árido seco.
 - Densidad real del árido saturado superficialmente seco (ρ_{RT}), en la que se considera la masa del árido seco más la masa del agua que llena los poros accesibles.
- b. Densidad neta (ρ_N), en la que se considera el volumen macizo de las partículas de material pétreo más el volumen de los poros inaccesibles.
- c. Absorción de agua (α)

Masa de agua necesaria para llevar un material árido del estado seco al estado saturado superficialmente seco. Se expresa como porcentaje referido a la masa del pétreo seco.

- Árido seco

Material secado en horno hasta masa constante. Esta condición se obtiene cuando dos pesadas sucesivas, separadas por 1 h de secado a 110 ± 5 °C, difieren en un porcentaje igual o inferior al 0.1% de la menor masa determinada.

Cálculos

- a) Densidad (ρ_R)

- a. Densidad real del árido saturado superficialmente seco (ρ_{RT})

Ec. 2.19 Densidad real del árido saturado superficialmente seco

$$\rho_{RT} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{M_{SSS}}{M_{SS} - M_{SUM}} * 1000$$

- b. Densidad real del árido seco (ρ_{RS})

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Automático

Ec. 2.20 Densidad real del árido seco

$$\rho_{RS} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{M_S}{M_{SSS} - M_{SUM}} * 1000$$

b) Densidad neta (ρ_N)**Ec. 2.21 Densidad neta**

$$\rho_N \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{M_S}{M_S - M_{SUM}} * 1000$$

c) Absorción de agua (α)**Ec. 2.22 Absorción de agua**

$$\alpha (\%) = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} * 1000$$

Donde:

 ρ = Densidad (Kg/m³) α = Absorción (%) M_{SUM} = Masa del árido sumergida (g) M_{SSS} = Masa del árido saturado superficialmente seco (g) M_S = Masa del árido seco (g)**2.6.5.5. Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128 AASHTO T84-00)**

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos.

Es aplicable a los áridos finos de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, que se emplean en el análisis de suelos, elaboración de hormigones y obras asfálticas.

a) Cálculos

a. Densidad (ρ_R)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Automático

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Automático

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Automático

b) Densidad real del árido saturado superficialmente seco (ρ_{RT})

Ec. 2.23 Densidad real del árido saturado superficialmente seco

$$\rho_{RT} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{M_{SSS}}{M_a + M_{SSS} + M_m} * 1000$$

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Automático

c) Densidad real del árido seco (ρ_{RS})

Ec. 2.24 Densidad real del árido seco

$$\rho_{RS} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{M_S}{M_a + M_{SSS} - M_m} * 1000$$

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Automático

a. Densidad neta (ρ_N)

Ec. 2.25 Densidad neta

$$\rho_N \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{M_S}{M_a + M_S - M_m} * 1000$$

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Automático

b. Absorción de agua (α)

Ec. 2.26 Absorción de agua

$$\alpha (\%) = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} * 1000$$

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Negrita, Sin Cursiva, Español (España)

Con formato: Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Automático

Donde:

P = Densidad (Kg/m³)

A = Absorción (%)

M_m = Masa del matraz de la muestra más agua hasta la marca de calibración (g)

M_{SSS} = Masa del árido saturado superficialmente seco (g)

M_S = Masa del árido seco (g)

2.6.5.6. Método para determinar el equivalente de arena (ASTM D2419)

Equivalente de arena es el porcentaje de arena propiamente tal con respecto al total de arena y de impurezas coloidales floculadas, particularmente arcillosas, húmicas y eventualmente ferruginosas.

Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por tamiz de 4.75 mm (N°4).

Tiene como objetivo principal determinar la calidad que tiene un suelo que se va emplear en las capas de un pavimento, esta calidad es desde el punto de vista de finos indeseables de naturaleza práctica.

2.6.5.7. Método para determinar el desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99)

El agregado pétreo está sujeto a una rotura adicional y a un desgaste por abrasión durante la elaboración, colocación y compactación de la mezcla asfáltica para pavimentación.

El agregado sufre, además, la abrasión debido a las cargas del tránsito.

Deben tener por lo tanto, en cierto grado, capacidad de resistir la trituración degradación y desintegración.

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

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2.36 mm, de densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m³, mediante la máquina de Los Ángeles.

El ensayo de abrasión o desgaste de Los Ángeles mide la resistencia al uso o abrasión del agregado mineral cuando el pavimento es sometido al tráfico vehicular. El porcentaje de desgaste medido por el ensayo de Los Ángeles no tiene en general ninguna relación con el pulimento de los áridos bajo el desgaste del tráfico.

El tambor de la máquina de desgaste, el cual es cargado con un peso determinado de partículas de agregado grueso con una graduación prefijada que se asemeja al material propuesto para el diseño en la mezcla asfáltica, así como un peso normalizado de esferas de acero que han de actuar como carga abrasiva. A continuación se hace dar al tambor 500 vueltas, después de lo cual se extrae el material y se determina el porcentaje de material que pasa por el tamiz número 12, que se define como porcentaje de desgaste.

2.6.6. Requerimientos del agregado pétreo

Según los Manuales Técnico para el diseño de Carreteras en Bolivia, los requerimientos son:

2.6.6.1. Requerimientos generales

Los áridos gruesos, retenidos sobre el tamiz 4.75 mm (N°4), deben ser partículas resistentes, durables, constituidas de fragmentos de roca, grava o escorias. Materiales que se quiebran con los ciclos alternados de hielo y sequedad, no deben ser usados.

Los áridos finos, que pasan por tamiz 4.75 mm (N°4), deben estar constituidos por arenas naturales o trituradas y por partículas minerales que pasan por tamiz 0.075 mm (N°200).

Las fracciones que pasan por tamiz 0.074 mm (N°200) no deberán ser mayores que los dos tercios de la fracción que pasa por tamiz 0.475 mm (N°40). Los límites de consistencia de la fracción que pasa por tamiz 0.475 mm estarán conformes a lo indicado en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Límites de consistencia de Atterberg

	Lim. líquido	Índice de plasticidad
Subbase	Máx. 35	Máx. 8
Base Estabilizada	Máx. 35	Máx. 6
Carpeta de Rodadura	Máx. 35	5 – 10

Fuente: Manuales Técnico para el diseño de Carreteras en Bolivia

Todo el material deberá estar libre de materias orgánicas y terrones de arcillas. La graduación de los materiales deberá estar conforme con los requerimientos de la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Bandas granulométricas para subbase, bases y capas de rodadura

Tamiz		TM-50a	TM-50b	TM-50c	TM-40a	TM-40b	TM-40c	TM-25
ASTM	(mm)							
2"	50	100	100	100				
1 1/2"	37.50	-	70-100	-	100	100	100	
1"	25.00	55-100	55-85	70-100	70-100	80-100	80-100	100
3/4"	19.00	-	45-75	60-90	50-80	-	-	70-100
3/8"	9.50	30-75	35-65	40-75	25-50	50-80	50-80	50-80
Nº4	4.75	20-65	25-55	30-60	10-30	35-65	35-65	35-65
Nº8	2.36	-	-	-	5-15	-	-	-
Nº10	2	10-50	15-45	15-45	-	25-50	25-50	25-50
Nº40	0.425	5-30	5-25	10-30	0-5	10-30	10-30	10-30
Nº200	0.075	0-20	0-10	0-15	0-3	5-15	5-15	5-15

Fuente: Manuales Técnico para el diseño de Carreteras en Bolivia

Los requerimientos de agregados para subbase, bases y capas de rodadura pueden ser resumidos en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Requerimientos de agregados para subbase, bases y capas de rodadura

	Graduación	% Chancado	CBR	Resistencia al desgaste de Los Ángeles	Resistencia a la compresión
Subbase	TM-50a		≥ 40%	≤ 40%	-
Base granular	TM-50b, TM-50C, TM-25	≥ 50%	≥ 80%	≤ 35%	-
Carpeta de rodadura	TM-40c	≥ 50%	≥ 60%	≤ 30%	-
Base granular tratada	TM-50c, TM-25	-	-	-	2.5 Mapa

Base con cemento (BTC)	-	$\geq 50\%$	-	-	4.5 Mpa
Base abierta ligada (BAL)	TM-40a	100%	-	$\leq 35\%$	-

[Fuente: Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia](#)

2.7. INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los agregados pétreos constituyen aproximadamente un 90% de las mezclas asfálticas, por lo que una distribución adecuada definirá características mecánicas como físicas, entre ellas densidad de la mezcla, contenido de vacíos, estabilidad, fluencia, resistencia a la fatiga, resistencia al deslizamiento, trabajabilidad entre las más importantes.

Por tanto una mala distribución afectará en forma directa en la mezcla provocando diferentes tipos de fallas como se presentarán a continuación.

2.7.2. Fallas típicas en pavimentos flexibles

Se presentarán fallas típicas que ocurren en pavimentos flexibles durante el proceso gradual de deterioro de los mismos, que son afectados por mala distribución granulométrica o a causa de algún equívoco de los agregados pétreos.

Estos daños afectan de diferente manera la condición y el comportamiento del pavimento. Algunos afectan las características superficiales (condiciones operativas) del pavimento, reduciendo su serviciabilidad; suele referirse a estos como defectos de superficie o daños funcionales, por cuanto no afectan la capacidad estructural del pavimento. En contraposición, otros afectan la integridad del pavimento reduciendo su habilidad para soportar las cargas del tránsito; se denominan daños estructurales y si bien afectan en grado diverso la serviciabilidad presente del pavimento, conducen más rápidamente a una pérdida de esta a mediano plazo.

Un mismo daño puede ser asociado a una u otra categoría, atendiendo al mecanismo específico que la origina. Por su importancia, al describir cada uno de los daños y sus

posibles causas, se incluyen también los elementos de juicio necesarios para su correcta valoración.

2.7.2.1. Ahuellamiento

a) Descripción:

Depresión longitudinal continúa a lo largo de las huellas de canalización del tránsito. Se entiende por ahuellamiento cuando la longitud afectada es mayor es mayor de 6m. Las repeticiones de las cargas conducen a una acumulación de las deformaciones permanentes en cualquiera de las capas del pavimento o su fundación. Cuando el radio de influencia de la zona amueladla es pequeño, las deformaciones ocurren en las capas superiores y suelen ser acompañadas de un deslizamiento y levantamiento lateral de la superficie del pavimento; cuando el radio de influencia es amplio, las deformaciones ocurren en las capas inferiores o en la fundación.

b) Posibles causas

Las repeticiones de las cargas del tránsito originan ahuellamiento como consecuencia de alguno de los factores siguientes:

a. Insuficiente estabilidad de las mezclas asfálticas por inadecuada compactación o deficiente dosificación.

b. Insuficiente estabilidad de las capas del pavimento o de la subrasante (falla por corte, compresión o desplazamiento lateral material) ya sea por ingreso de agua o deficiente calidad.

c. Espesores de pavimento insuficientes (infra diseño estructural) para las repeticiones de carga soportadas.

d. Exagerado incremento en las cargas del tránsito.

c) Niveles severidad

La severidad del Ahuellamiento a determinar en función de la profundidad de la huella, midiendo ésta con una regla de 1.20 m de longitud, colocada transversalmente al eje de la calzada; la medición se efectúa donde la profundidad es mayor, promediando los valores determinados a intervalos

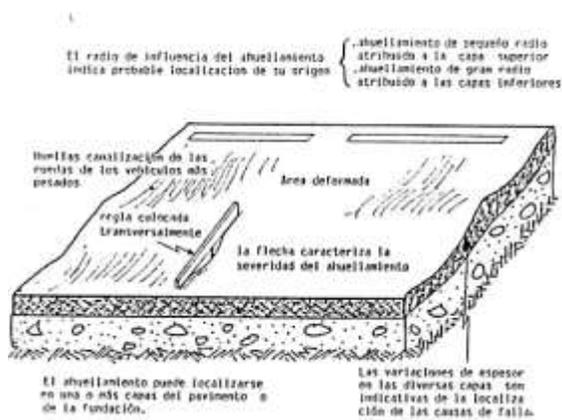
de 6m, a lo largo de la misma. Se identifican tres niveles de severidad (bajo, medio y alto) según la siguiente guía:

- a. B: La profundidad promedio es de 6mm a 13 mm.
- b. M: La profundidad promedio es de 13 mm a 25 mm.
- c. A: La profundidad promedio es mayor de 25 mm.

d) Medición

El ahuellamiento se mide en metros cuadrados multiplicando su longitud por el ancho afectado por la huella. Se registran separadamente, según su severidad, las áreas totales medidas en la muestra o sección.

Figura 2.10 Esquema deformación por ahuellamiento



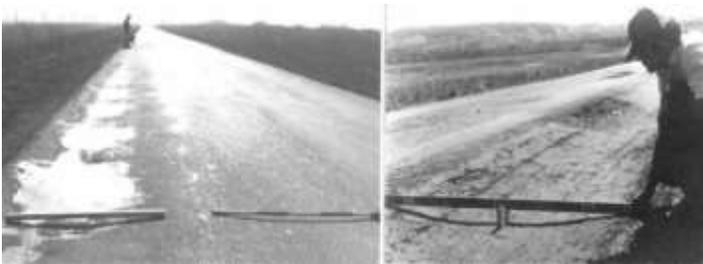
Fuente: Identificación De Fallas En Pavimentos Y Técnicas De Reparación (Catálogo De Fallas)

Ilustración 2.2 Ahuellamiento severidad baja, ahuellamiento severidad media



Fuente: Identificación De Fallas En Pavimentos Y Técnicas De Reparación (Catálogo De Fallas)

Ilustración 2.3 Ahuellamiento severidad alta-media, ahuellamiento severidad alta



Fuente: Identificación De Fallas En Pavimentos Y Técnicas De Reparación (Catálogo De Fallas)

- e) Alternativas de Mantenimiento
- a. Severidad baja
 - Ninguna acción.
 - b. Severidad media
 - Bacheo superficial nivel ante: mezcla en frío / en caliente.
 - Bacheo parcial capa asfáltica: mezcla en frío / caliente.
 - c. Severidad alta
 - Badén parcial, capa asfáltica: mezcla en frío / en caliente.
 - Badén profundo: incluido posición de base.

- Perfilado en frío y reposición con recapado con mezcla en caliente.

2.7.2.2. Fisura transversal

a) Descripción

Fractura miento rectilíneo que se extiende a través de la superficie del pavimento perpendicularmente al eje de la calzada. Puede afectar todo el carril o ancho de calzada como limitarse a los 0.60m próximos al borde. A veces las fisuras transversales se distribuyen a intervalos más o menos regulares, con espaciamiento variables entre 5 y 20m. Al igual que las fisuras longitudinales puede desarrollar ramificaciones y fisuras paralelas “multiplicidad”. Se excluyen de este grupo las fisuras provenientes de la reflexión de juntas transversales, características de pavimentos mixtos en los que existe una losa de hormigón bajo la capa asfáltica

b) Posibles causas

Las siguientes causas pueden dar origen a fisuras transversales:

- a. Insuficiente espesor del pavimento frente a las cargas del tránsito (infra diseño estructural)
- b. Falta de sobre ancho y/o contaminación de las capas inferiores en la proximidad de los bordes del pavimento, o deficiente contención lateral (fisuras de bordes);
- c. **Retracción de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad debido a un exceso de filler**, envejecimiento (oxidación) del asfalto, etc., particularmente ante gradientes térmicos frecuentes
- d. Reflexión de grietas que acompañan movimientos de la bases, particularmente la retracción de bases estabilizadas con ligante hidráulicos (cemento) y grietas en losa de hormigón
- e. Apertura de juntas de construcción defectuosamente ejecutadas

- f. Contracción por desecación de los terraplenes o asentamiento de esto y/o su fundación.

c) Niveles severidad

Se definen tres niveles de severidad (bajo, medio y alto) en base al ancho o abertura promedio y el grado de multiplicidad o ramificación con que se desarrollan en el pavimento:

- a. B: Existen algunas condiciones siguientes:

Fisura simple, sin sellar, de ancho promedio inferior a 5mm; no hay signos de descascaramiento ni desnivel alrededor de sus bordes. Fisura sellada, de cualquier ancho, con material de sello en condición satisfactoria (no permite ingreso de agua).

- b. M: Existe alguna de las condiciones siguientes:

Fisura sin sellar, de ancho promedio mayor de 5mm; no hay signos de descascaramiento o este muy leve. Fisura sellada de cualquier ancho material de sello en condición insatisfactoria (permite ingreso del agua). Fisuras sellada o no, de cualquier ancho, que evidencian algunos de los siguientes signos de degradación: moderado descascaramiento o desportillamiento alrededor de sus bordes; ramificación en forma de fisura erráticas finas (baja severidad), próximas a la fisura o intersecándolas; la fisura produce golpeteo y al vehículo al circular sobre ella (bordes levemente desnivelados).

- c. A: Existe algunas de las condiciones siguientes:

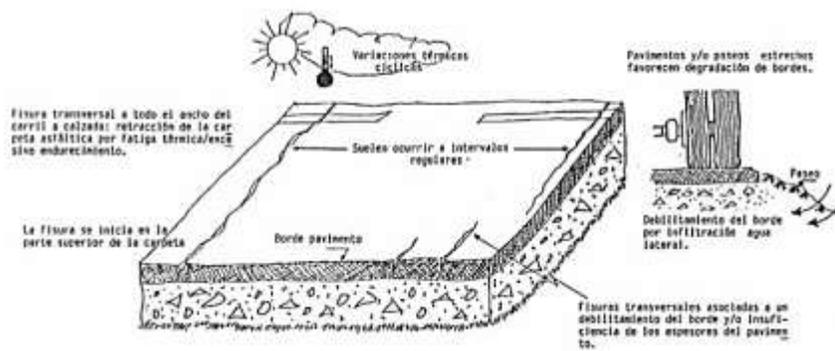
Fisura de bordes severamente desportillados o descascarados. Fisura múltiple, ramificada o acompañada de fisuras paralelas de severidad media a alta. La fisura causa un fuerte balanceo o golpeteo al vehículo, al circular sobre ella (bordes significativamente desnivelados).

d) Medición

Las fisuras transversales se miden en metros lineales. Se identifica la longitud y severidad de cada fisura; si la fisura se presenta el mismo nivel de severidad

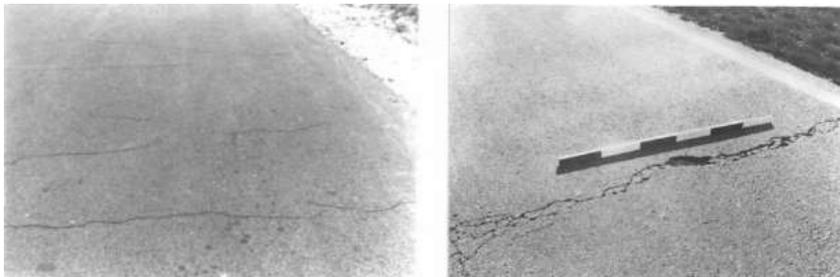
en toda su extensión, debe registrarse separadamente cada porción con diferente grado de severidad. Se totaliza el número de metros lineales-correspondientes a cada uno de los tres niveles de severidad-observados en la sección de pavimento evaluada.

Figura 2.11 Esquema deformación por fisura transversal



Fuente: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)

Ilustración 2.4 Fisura transversal severidad media, fisura transversal severidad alta



Fuente: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)

- e) Alternativas de mantenimiento
- a. Severidad baja
 - Ninguna acción.
 - b. Severidad media
 - Sellado de fisuras con asfalto líquido o emulsión bituminosa + arena
 - Sellado bituminoso de la superficie con recubrimiento de agregado pétreo.
 - Sellado de la superficie con lechada asfáltica (slurry seal)
 - c. Severidad alta
 - Sellado de fisuras con mortero asfáltico; asfalto líquido o emulsión bituminosa + arena
 - Bacheo parcial, capa asfáltica; mezclas asfálticas en frío o caliente.
 - Sellado bituminoso de la superficie con recubrimiento de agregado pétreo.
 - Sellado de la superficie con lechada asfáltica (slurry seal).
 - Recapado con mezcla asfáltica en caliente (espesor variable s/tránsito).

2.7.2.3. Fisura en bloque

a) Descripción

Fisuras y grietas interconectadas que dividen la superficie del pavimento en polígonos aproximadamente rectangulares. El tamaño de los bloques varía en un rango de alrededor de 0.9 m² hasta un máximo de 9 m². Cuando los bloques resultan de mayor tamaño son identificados generalmente como fisuras longitudinales y transversales. Siendo este un fenómeno no asociado a las cargas de tránsito (el tránsito sin embargo puede incrementar su severidad) se desarrollan en cualquier parte del pavimento, normalmente cubriendo un amplia área; a veces ocurren sólo un áreas no traficadas.

Las fisuras en bloques se diferencian de las fisuras tipo piel de cocodrilo en cuanto a que en estas los polígonos son más pequeños, irregulares y de ángulo agudo, y que tratándose de un fenómeno asociado a las repeticiones de cargas, las fisuras piel de cocodrilo se localizan en: las áreas más traficadas (huellas de canalización del tránsito).

b) Posibles causas

Las siguientes pueden dar origen a fisuras en bloques:

- a. Excesiva contracción de la mezcla asfáltica inducida por cambios de temperatura y/o humedad en la misma
- b. Excesivo endurecimiento del bitumen por deficiencia durante el manipuleo y elaboración de la mezcla asfáltica, o bien por una prolongada exposición y oxidación durante el periodo de servicio
- c. **Mezcla asfáltica muy rígida, como consecuencia de un exceso de filler en la misma**
- d. Reflexión de grietas originadas en una capa subyacente debido a la retracción de bases estabilizadas hidráulicamente, fisuras múltiples en losas de hormigón, o eventualmente recapados delgados sobre pavimentos antiguos muy agrietados
- e. Debilitamiento brusco de las capas inferiores, (generalmente por saturación de los materiales)

c) Niveles severidad

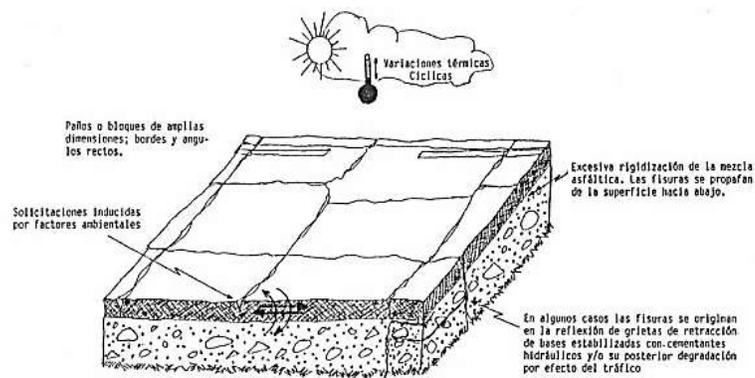
Se definen tres niveles de severidad (bajo, medio y alto) en función de la severidad de las fisuras que definen los bloques:

- a. B: Los bloques están delimitados predominantemente por fisuras transversales y longitudinales de nivel de severidad Bajo.
- b. M: Los bloques están delimitados predominantemente por fisuras transversales y longitudinales de nivel de severidad Medio.
- c. A: Los bloques están delimitados predominantemente por fisuras transversales y longitudinales de nivel de severidad Alto.

d) Medición

Las fisuras en bloques se miden en metros cuadrados de superficie total afectada en la unidad o sección de pavimento evaluada. Por lo común se manifiestan con un único nivel de severidad. En el caso de observarse diferentes niveles de severidad, las áreas afectadas deben medirse y, registrarse separadamente, de acuerdo a su severidad.

Figura 2.12 Esquema deformación por fisura en bloque



Fuente: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)

Ilustración 2.5 Fisura en bloques severidad media, fisura en bloques severidad alta



Fuente: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)

e) Alternativas de mantenimiento

a. Severidad baja

- Aplicar sellado de superficie con emulsión bituminosa o rejuvenecedora.

b. Severidad media

- Sellado de la superficie con lechada asfáltica (slurry seal).
- Sellado de la superficie con material bituminoso c/recubrimiento de agregado pétreo (carreteras de TMA < 2000).
- Sellado de la superficie con lechada asfáltica (carreteras de TMA < 2000).
- Tratamiento superficial asfáltico doble/triple (carreteras de TMA < 2000).

c. Severidad alta

- Sellado de la superficie afectada con material bituminoso con recubrimiento agregado pétreo.

- Sellado de la superficie afectada con lechada asfáltica (slurry seal).
- Bacheo parcial, capa asfáltica; mezclas asfálticas en frío o caliente.
- Trabajos de preparación previa + recapado con mezcla asfáltica en caliente.
- Trabajos de preparación previa + recapado delgado con mezcla asfáltica en caliente.
- Colocación de geo textil + recapado delgado con mezcla asfáltica caliente.

2.7.2.4. Fisura en arco

a) Descripción

Fisuras en forma de media luna –o más precisamente de cuarto creciente– que tienen generalmente sus dos extremos apuntando hacia fuera en la dirección del tráfico. Ocurren fundamentalmente en la huellas de canalización del tránsito en correspondencia con sectores de frenado o cambio de dirección. A veces se las denomina también “fisuras por resbalamiento” aludiendo al mecanismo que las produce.

b) Posibles causas

Las fisuras en arco se producen cuando las fuerzas horizontales provocadas por el frenado o cambio de dirección de las ruedas del tránsito vehicular son suficientemente importantes como para hacer deslizar y deformar la capa asfáltica superficial. Esta situación se presenta cuando:

- a. Se combina una **mezcla asfáltica de baja estabilidad** y una deficiente adherencia entre la capa superficial y la capa inmediatamente subyacente.
- b. Es deficiente la adherencia en la interface capa asfáltica/base como consecuencia de la falta de riego de la liga, contaminación de polvo

antes o durante su ejecución o por el contrario, un exceso de la dotación de la ligante.

- c. Los espesores de carpeta son muy reducidos y son colocados sobre una superficie fácilmente degradable (bases estabilizadas con ligantes hidráulicos) o excesivamente pulida (pavimentos de hormigón).

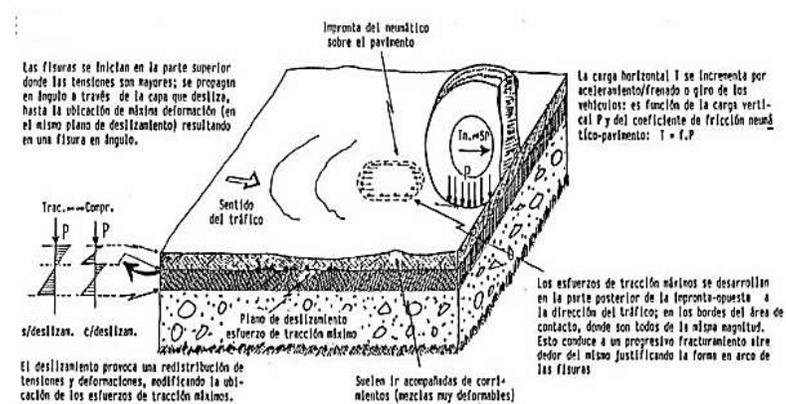
c) Niveles severidad

No se definen diferentes niveles de severidad: es suficiente con indicar que existen fisuras en arco, por resbalamiento. Si inicialmente se presentan como un conjunto de fisuras finas dispuestas paralelamente, una vez que el deslizamiento de la mezcla ha tenido lugar su evolución es muy rápida: se fractura el área alrededor de las grietas en trozos fácilmente removibles, que desaparecen rápidamente por acción del tránsito, dando lugar a un “bache”.

d) Medición

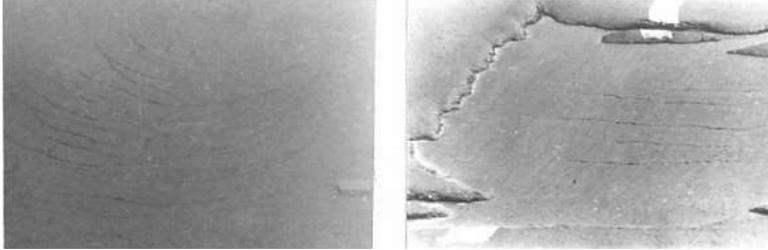
Las fisuras en arco se miden en metros cuadrados totalizados la superficie afectada dentro de la unidad o sección de pavimento evaluada.

Figura 2.13 Esquema deformación por fisura en arco



Fuente: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)

Ilustración 2.6 Fisuras en arco, fisuras en arco aún visibles en bache superficial



Fuente: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)

e) Alternativas de mantenimiento

- Aplicar sellado de superficie afectada con emulsión bituminosa.
- Sellado de fisuras con emulsión bituminosa/ asfalto líquido
- Bacheo parcial, capa asfáltica; mezclas asfálticas en caliente.
- Escarificación carpeta asfáltica existente y reposición con mezcla asfáltica en caliente.

2.7.2.5. Desintegraciones por desprendimiento/descubrimiento agregados

a) Descripción

Desgaste gradual de la superficie de rodamiento como consecuencia de la disgregación y desprendimiento del material fino que la conforma, o de la separación y pérdida del matice (ligante + fino) alrededor de la matriz de agregados, dejando a esta cada vez más expuesta a la acción abrasiva del tránsito y del clima. La superficie parece desintegrarse en pequeños trozos dando lugar a una textura más abierta y rugosa. Ocurren con más frecuencia en tratamientos asfálticos y mezclas en frío; pueden cubrir amplios sectores de la calzada o concentrarse en las huellas de canalización del tránsito.

b) Posibles causas

Son defectos de superficie asociadas en general a una pérdida de las propiedades ligantes del asfalto como consecuencia de:

- a. Excesivo endurecimiento del bitumen debido a un inapropiado manípulo (sobre calentamiento) durante la elaboración de la mezcla asfáltica o su puesta en obra (riegos).
 - b. Insuficiente dotación del material bituminoso o inadecuada **gradación de los agregados pétreos**.
 - c. Pérdida de adhesión entre el bitumen y el agregado en presencia de agua debido al empleo de agregados de mayor afinidad con el agua (hidrófilos), sucios (contaminados), y/o húmedos, o a la exigencia de burbujas de aires atrapadas en el revestimiento asfáltico debido a deficiencias en el proceso constructivo.
 - d. Oxidación del bitumen luego de un prolongado periodo de servicio, particularmente cuando revestimientos con alto contenido de vacíos son expuestos a condiciones climáticas desfavorables (radiación solar-precipitaciones intensas).
 - e. Fractura de las partículas de agregado por efecto de las presiones aplicadas durante la compactación (puesto en obra) o por el tráfico vehicular durante el periodo de servicio, o por causas naturales, posibilitando que las partículas sueltas o parcialmente recubiertas sean levantadas del tránsito.
 - f. Importantes sollicitaciones tangenciales (curvas, rampas, etc.) en combinación con algunos de los factores mencionados.
- c) Niveles severidad

Se definen tres niveles de severidad (bajo, medio y alto) de acuerdo con la siguiente guía:

- a. B: Hay signos de que el agregado pétreo y/o mastic bituminoso han comenzado a desprenderse. La superficie aun cuando evidencia cierto desgaste se mantiene firme y bien ligada. No hay excesiva proyección del agregado en la superficie (tratamiento asfáltico).
- b. M: El desprendimiento de material fino y/o mastic bituminoso es significativo, dejando expuesto al agregado grueso. La superficie

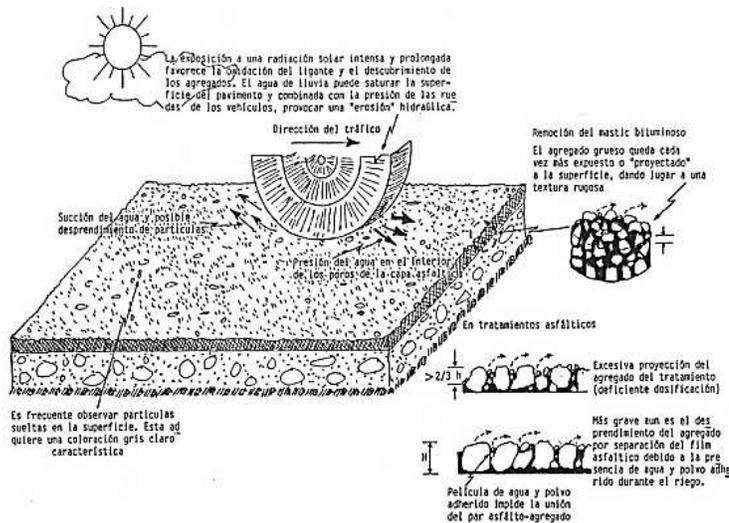
del pavimento presenta una textura abierta y rugosa; suelen existir partículas sueltas o fácilmente disgregables. Excesiva proyección del agregado en la superficie (tratamientos asfálticos).

- c. A: El desprendimiento del agregado es extensivo e incluye la remoción del material grueso. La superficie del pavimento resulta muy irregular por la gran exposición del agregado grueso y la existencia de frecuentes “peladuras” o pequeñas cavidades distribuidas erráticamente (alto nivel de rugosidad y ruido).

d) Medición

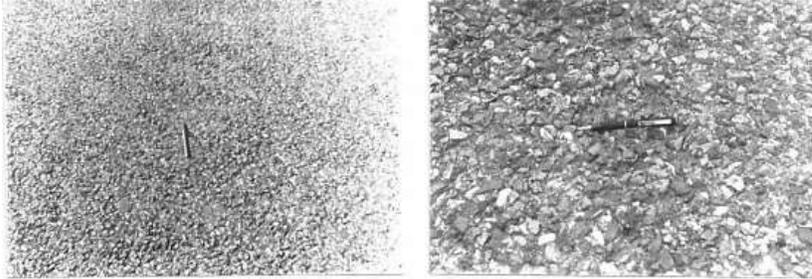
El descubrimiento/desprendimiento de agregados se mide en metros cuadrados de superficie afectada, midiendo y registrando éstas separadamente, según el nivel de severidad identificado en cada caso.

Figura 2.14 Esquema desintegraciones por desprendimiento/descubrimiento agregados



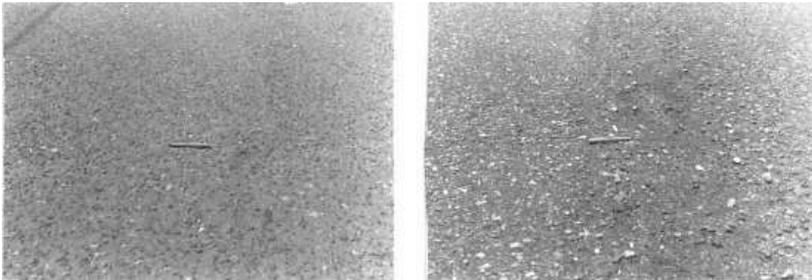
Fuente: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)

Ilustración 2.7 Desprendimiento severidad baja en tratamiento asfáltico, desprendimiento severidad alta en tratamiento asfáltico



Fuente: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)

Ilustración 2.8 Desprendimiento severidad baja en carpeta asfáltica, 2.9 desprendimiento severidad media en carpeta asfáltica



Fuente: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)

Ilustración 2.10 Desprendimiento severidad alta en carpeta asfáltica

Fuente: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)

- e) Alternativas de mantenimiento
 - a. Severidad baja
 - Aplicar riego con emulsión bituminosa o rejuvenecedora en toda la superficie.
 - b. Severidad media
 - Aplicar riego con emulsión bituminosa o rejuvenecedora en toda la superficie.
 - Sellado de la superficie afectada con material bituminoso y recubrimiento de arena.
 - Sellado de la superficie afectada con lechada asfáltica (slurry seal).
 - c. Severidad alta
 - Bacheo superficial; mezcla asfáltica de frío/en caliente.
 - Sellado de la superficie afectada con material bituminoso y recubrimiento de arena.
 - Sellado de la superficie con material bituminoso y descubrimiento y agregado pétreo.
 - Sellado de la superficie con lechada asfáltica (1 o más aplicaciones).

- Tratamiento superficial asfáltico doble o triple s/volumen de tránsito.
- Recapado delgado con mezcla asfáltica en caliente (carretera con TMDA>2000).

2.7.2.6. Desintegraciones por estría longitudinales

a) Descripción

Sucesión de peladuras y/o de desprendimientos pétreos de la superficie pavimento que se distribuyen linealmente, en forma de forma de uno o más surcos longitudinales, paralelos al eje de la vía. Ocurren exclusivamente en unos tratamientos asfálticos superficiales y riegos bituminosos: los daños se alienan en coincidencia con la dirección del riego.

b) Posibles causas

- a. Las estrías longitudinales tienen su origen en deficiencias en el proceso constructivo de riegos y tratamientos asfálticos, que conducen a una des uniforme distribución del material bituminoso sobre la superficie de la calzada, como consecuencia de:
- b. Inadecuada altura de la barra de riego del camión distribuidor de asfalto o variación de este durante la operación de riego.
- c. Deficiente funcionamiento de la barra de riego por obturación de los picos regadores.
- d. **Variaciones en el dosaje de agregados pétreos debido a su deficiente distribución** y/o segregación durante el proceso constructivo.

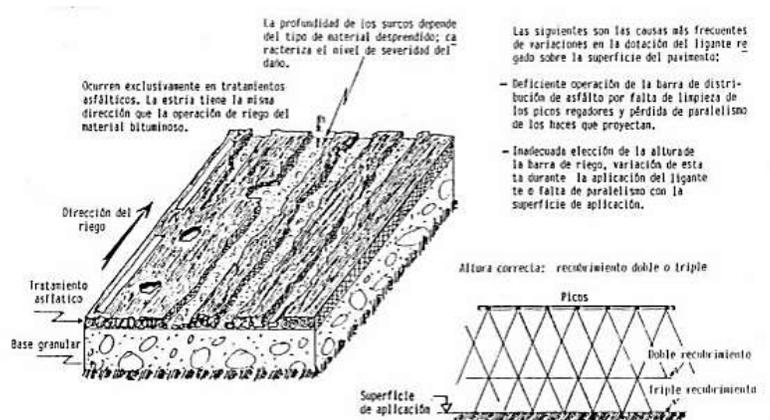
c) Niveles severidad

Se definen tres niveles de severidad (bajo, medio y alto), en base a las condiciones prevalecientes observadas de acuerdo con la siguiente guía:

- a. B: Los surcos se aprecian fundamentalmente a través de un cambio en la coloración de la superficie. Los desprendimientos son de nivel de severidad bajo y no se observan peladuras.

- b. M: Los surcos son manifiestos como consecuencia de la pérdida de la gravilla; su profundidad no sobrepasa los 6mm. Los desprendimientos son de severidad bajo y no se observan peladuras.
- c. A: Los surcos son profundos y en algunos sectores comprenden todo el revestimiento (pérdidas de agregados gruesos y finos). Los desprendimientos son de severidad alta acompañados usualmente de peladuras. Puede ser claramente percibido por los vehículos más livianos.
- d) Medición
- Se miden en metros cuadrados de superficie de pavimento afectada, midiendo y registrando las áreas separadamente según su nivel de severidad.

Figura 2.15 Esquema desintegración por estría longitudinal



Fuente: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)

Ilustración 2.11 Estría severidad baja, estría severidad media, estría severidad alta



Fuente: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)

e) Alternativas de mantenimiento

a. Severidad baja

- Aplicar riego con emulsión bituminosa o rejuvenecedora en áreas afectadas.

b. Severidad media

- Aplicación riego con emulsión bituminosa o rejuvenecedora en áreas afectadas.
- Sellado de superficie afectada c/material bituminoso y recubrimiento de arena.
- Sellado de superficie afectada con lechada asfáltica (Slurry Seal).

c. Severidad alta

- Aplicación riego con emulsión bituminosa o rejuvenecedora en áreas afectadas.
- Sellado de superficie afectada c/material bituminoso y recubrimiento de arena.
- Sellado de superficie afectada con lechada asfáltica (Slurry Seal).
- Tratamiento superficial asfáltico doble o triple s/ volumen de tránsito.

2.7.2.7. Falla por exudación de asfalto

a) Descripción

Afloramiento de material bituminoso de la mezcla a la superficie del pavimento, formando una película o film continuo de ligante o mastic (ligantes + finos). La superficie adquiere en consecuencia un aspecto brillante, tornándose reflectante, resbaladiza y pegajosa en tiempo caluroso. El proceso de exudación es irreversible: el afloramiento de asfalto en la estación cálida no se absorba durante el clima frío.

b) Posibles causas

Las siguientes causas pueden dar origen a exudación de asfalto:

- a. Exceso de asfalto en la mezcla o tratamiento.
- b. Insuficiencia contenido de vacío (el asfalto colma los vacíos de la mezcla).**
- c. Excesiva dotación de asfalto en el riego de la liga.
- d. Bitumen muy blando para condiciones de servicio desfavorables (tránsito pesado intenso, altas temperaturas en el pavimento).
- e. Sobre compactación de la mezcla o tratamientos asfáltico o dosificación para condiciones de tránsito menores que las reales.

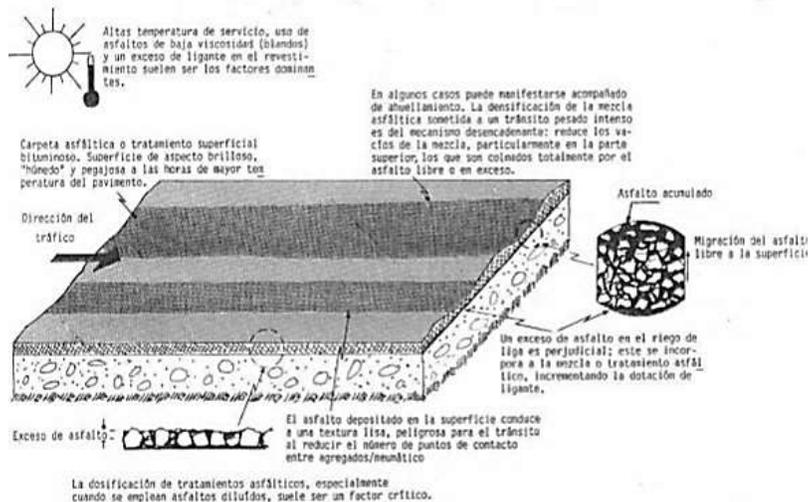
c) Niveles severidad

Se definen tres niveles de severidad (bajo, moderado y alta) de acuerdo a la siguiente modalidad:

- a. B: Se hace visible la coloración de la superficie por efecto de pequeñas migraciones de asfalto, aún aisladas.
 - b. M: Apariencia características, con exceso de asfalto libre que forma una película continua en huellas de canalización del tránsito; la superficie se torna adhesiva a zapatos y ruedas de vehículos en días cálidos.
 - c. A: Presencia de una cantidad significativa de asfalto libre le da a la superficie un aspecto húmedo, de intensa coloración negra; superficie pegajosa o adhesiva.
- d) Medición

La exudación de asfalto se mide en metros cuadrados de superficie afectada, registrando separadamente está según su severidad.

Figura 2.16 Esquema falla por exudación de asfalto



Fuente: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)

Ilustración 2.12 Exudación severidad baja



Fuente: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)

Ilustración 2.13 Exudación severidad media, exudación severidad alta



Fuente: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación (Catálogo de fallas)

e) Alternativas de mantenimiento

a. Severidad baja y media

- Ninguna acción.

b. Severidad alta :

- Bacheo parcial (capa asfáltica).
- Quemar exceso de asfalto y aplicar un sellado bituminoso con asfalto líquido y recubrimiento arena o lechada asfáltica (carreteras de TMDA < 2000).
- Quemar exceso de asfalto y aplicar un tratamiento superficial asfáltico (carreteras de TMDA < 2000).

CAPITULO III

**DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y
EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA DE
DIFERENTES GRANULOMETRÍAS EN
ESTAS.**

CAPITULO III

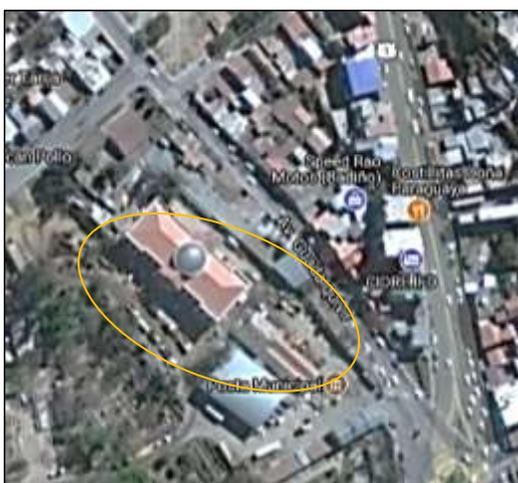
3. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA DE DIFERENTES GRANULOMETRÍAS EN ESTAS.

3.1. CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES

3.1.1. Caracterización del cemento asfáltico

El cemento asfáltico es proveniente de la planta almacenadora de asfalto (cemento asfáltico de origen Brasileño) de la Alcaldía Municipal de la Ciudad de Tarija, Posta Municipal, ubicada en el Barrio Guadalquivir en la Av. Guadalquivir, ver Ilustración 3.1.

Ilustración 3.1 Ubicación de la posta municipal



Fuente: Google Maps

Para poder caracterizar el cemento asfáltico se realizaron una serie de ensayos descritos en el capítulo anterior, a continuación se presentará un cuadro con resultados obtenidos en el laboratorio de nuestra casa superior de estudios.

3.1.1.1. Ensayo de penetración (ASTM D5 AASHTO T49-97)

Tabla 3.1 Ensayo de penetración

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
Penetración a 25°C, 100s. 5seg.(0.1mm)						Mínimo	Máximo
Lectura N°1	mm.	93	97	93	93	85	100
Lectura N°2	mm.	96	90	94			
Lectura N°3	mm.	91	95	91			
Promedio	mm.	93	94	93			

Fuente: Elaboración propia

3.1.1.2. Determinación del punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 AASHTO T53-96)

Tabla 3.2 Punto de ablandamiento

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
Punto de Ablandamiento						Mínimo	Máximo
	°C	44	47	45	45	42	53

Fuente: Elaboración propia

3.1.1.3. Determinación del los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01 AASHTO T79.96)

Tabla 3.3 Punto de inflamación y combustión

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación	°C	285	283	282	283	230	-

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Punto de Combustión	°C	320	318	323	320	300	-

Fuente: Elaboración propia

3.1.1.4. Determinación de la ductilidad (ASTM D 113 AASHTO T51-00)

Tabla 3.4 Ductilidad

Ensayo	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Ductilidad	Cm	107.0	108.0	107.4	107	100	

Fuente: Elaboración propia

3.1.1.5. Determinación de la densidad (ASTM D71-94 AASHTO T 229-97)

Tabla 3.5 Densidad

Ensayo	Unid	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	P	Especificaciones	
						Mínimo	Máximo
Densidad							
Peso Picnómetro	grs.	37.99	37.97	38.06	1.02	1	1.05
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	65.82	62.83	62.85			
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	57.35	57.30	57.80			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	65.98	63.41	63.25			
Peso Específico	grs./cm ³	1.01	1.03	1.02			

Fuente: Elaboración propia

3.1.1.6. Análisis de la caracterización de cemento asfáltico

El cemento asfáltico presenta una penetración promedio de 93 mm, a 25° C, punto de ablandamiento de 45° C, punto de inflamación mayor a 283° C, punto de ignición mayor a 320° C, ductilidad promedio de 107 cm y un peso específico de 1.02 gr/cm³; todos y cada uno de estos resultados cumplen con las especificaciones técnicas solicitadas según el tipo de cemento asfáltico (CA 85-100), es decir el cemento asfáltico presenta las condiciones adecuadas para su uso en el diseño de mezclas asfálticas.

3.1.2. Caracterización del agregado pétreo

El agregado utilizado es proveniente de la “Chancadora La Pintada”, ubicado a aproximadamente 7 km fuera de la ciudad, Ver Ilustración 3.2, se eligió esta chancadora por su predisposición en cercanía y la variabilidad de los tamaños de agregados, característica idónea para los fines de este escrito.

Ilustración 3.2 Imagen satelital de la chancadora



Fuente: Google Maps

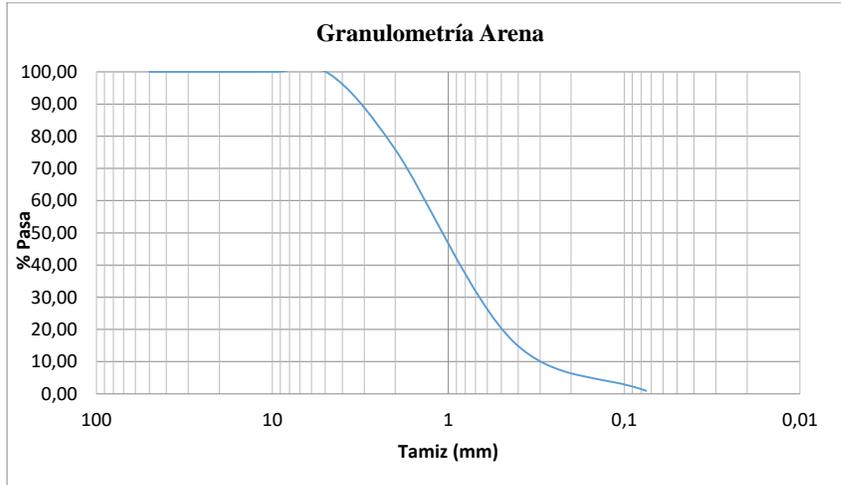
3.1.2.1. Análisis granulométrico por tamizado de los agregados (ASTM D422 AASHTO T88)

a) Arena

Tabla 3.6 Granulometría arena

Peso Total (gr.)	5010				
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa
2"	50	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	0.00	100.00
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	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº4	4.75	33.00	33.00	0.66	99.34
Nº10	2.00	1178.90	1211.90	24.19	75.81
Nº40	0.43	2988.60	4200.50	83.84	16.16
Nº200	0.075	761.20	4961.70	99.04	0.96
BASE		48.20	5009.90	100.00	0.00
	TOTAL	5009.90			
	PÉRDIDAS	0.10			
	MF	2.08			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1 Granulometría arena

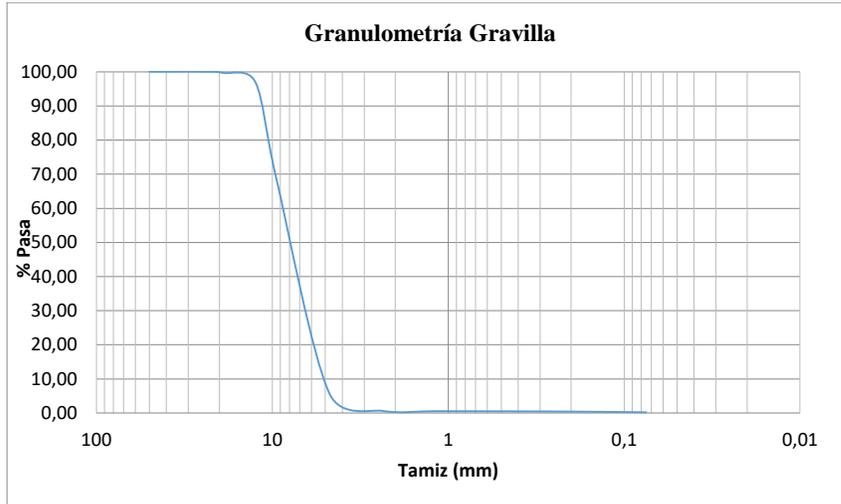
Fuente: Elaboración propia

b) Gravilla

Tabla 3.7 Granulometría gravilla

Peso Total (gr.)	5000.4				
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa
2"	50	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	18.30	18.30	0.37	99.63
1/2"	12.5	135.10	153.40	3.07	96.93
3/8"	9.50	1412.70	1566.10	31.32	68.68
Nº4	4.75	3143.80	4709.90	94.19	5.81
Nº8	2.36	257.90	4967.80	99.35	0.65
Nº16	1.18	4.10	4971.90	99.43	0.57
Nº30	0.60	1.30	4973.20	99.46	0.54
Nº50	0.30	2.60	4975.80	99.51	0.49
Nº100	0.15	4.80	4980.60	99.60	0.40
Nº200	0.075	8.00	4988.60	99.76	0.24
BASE		6.80	4995.40	99.90	0.10
	TOTAL	4995.40			
	PÉRDIDAS	5.00			
	MF	7.23			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.2 Granulometría gravilla

Fuente: Elaboración propia

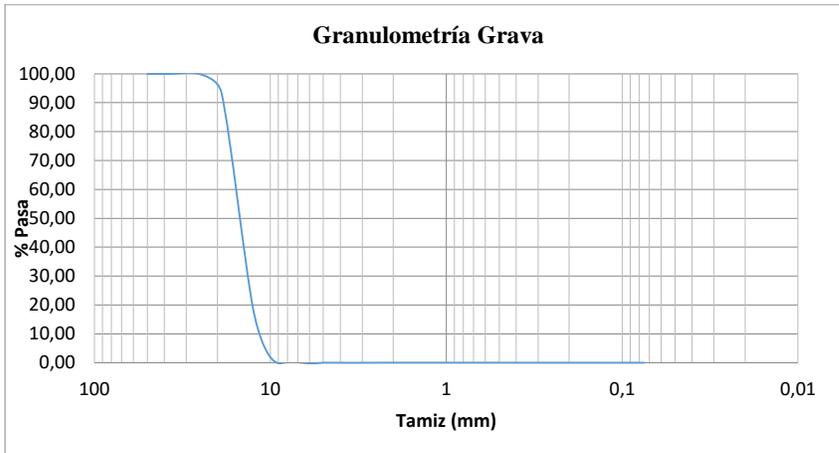
c) Grava

Tabla 3.8 Granulometría grava

Peso Total (gr.)		5000.4			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% que pasa
2"	50	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.50	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.0	319.80	319.80	6.40	93.60
1/2"	12.5	3769.00	4088.80	81.77	18.23
3/8"	9.50	883.50	4972.30	99.44	0.56
N°4	4.75	25.60	4997.90	99.95	0.05
N°8	2.36	0.00	4997.90	99.95	0.05
N°16	1.18	0.20	4998.10	99.95	0.05
N°30	0.60	0.10	4998.20	99.96	0.04
N°50	0.30	0.20	4998.40	99.96	0.04
N°100	0.15	0.20	4998.60	99.96	0.04
N°200	0.075	0.50	4999.10	99.97	0.03
BASE		0.50	4999.60	99.98	0.02
TOTAL		4999.60			
PÉRDIDAS		0.80			
MF		7.99			

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.3 Granulometría grava



Fuente: Elaboración propia

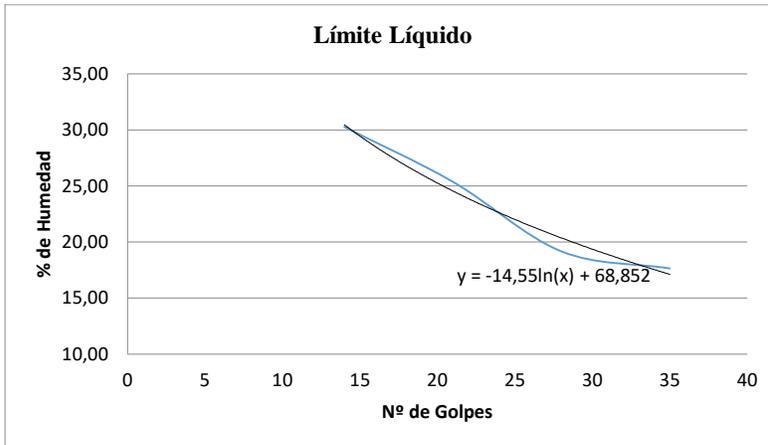
3.1.2.2. Determinación del límite líquido de los suelos (ASTM D4318 AASHTO T89)

Tabla 3.9 Límite líquido

Capsula N°	1	2	3	4
N° de golpes	14	21	28	35
Suelo Húmedo + Cápsula	33.4	35.6	37.1	41.6
Suelo Seco + Cápsula	30.1	32.30	34.3	38
Peso del agua	3.3	3.3	2.8	3.6
Peso de la Cápsula	19.2	19.3	19.7	17.6
Peso Suelo seco	10.9	13	14.6	20.4
Porcentaje de Humedad	30.28	25.38	19.18	17.65

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.4 Límite líquido



Fuente: Elaboración propia

3.1.2.3. Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D431 AASHTO T 90)

Tabla 3.10 Límite plástico e índice de plasticidad

Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula	18.3	19.1	19.4
Peso de suelo seco + Cápsula	18.1	18.9	19.3
Peso de cápsula	16.9	17.6	18.6
Peso de suelo seco	1.20	1.30	0.70
Peso del agua	0.20	0.20	0.10
Contenido de humedad	16.67	15.38	14.29
Límite Plástico (LP)			
15.45			
Índice de plasticidad (IP)			
6.57			

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.4. Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM E 127 AASHTO T85-91)

Tabla 3.11 Densidad grava

Muestra N°	Peso muestra secada (Ms)	Peso muestra saturada con sup. seca (Msss)	Peso muestra saturada dentro del agua (Msum)	Densidad real del árido superficialmente seco (ρ_{RS})	Densidad real del árido seco (ρ_{RT})	Densidad neta (ρ_N)	% de absorción
	(gr)	(gr)	(gr)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(%)
1	4993.80	5042.00	3115.00	2.59	2.62	2.66	0.97
2	4995.10	5044.00	3118.00	2.59	2.62	2.66	0.98
3	4997.50	5046.00	3121.00	2.60	2.62	2.66	0.97
Promedio				2.59	2.62	2.66	0.97

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12 Densidad gravilla

Muestra N°	Peso muestra secada (Ms)	Peso muestra saturada con sup. seca (Msss)	Peso muestra saturada dentro del agua (Msum)	Densidad real del árido superficialmente seco (ρ_{RS})	Densidad real del árido seco (ρ_{RT})	Densidad neta (ρ_N)	% de absorción
	(gr)	(gr)	(gr)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(%)
1	4977.20	5105.70	3230.00	2.65	2.72	2.85	2.58
2	4976.00	5103.70	3229.00	2.65	2.72	2.85	2.57
3	4978.00	5106.80	3233.00	2.66	2.73	2.85	2.59
			Promedio	2.65	2.72	2.85	2.58

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.5. Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos (ASTM E 128 AASHTO T84-00)

Tabla 3.13 Densidad arena

Muestra N°	Peso muestra (Ms)	Peso matraz	P. muestra +matraz +agua (Mm)	Peso del agua (Mw)	Peso muestra secada (Msss)	Volumen del matraz (V)	Densidad real del árido superficialmente seco (ρ_{RS})	Densidad real del árido seco (ρ_{RT})	Densidad neta (ρ_N)	% de absorción
	(gr)	(gr)	(gr)	(ml) ó (gr)	(gr)	(ml)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	
1	500.00	213.80	996.00	282.20	491.10	500.00	2.25	2.30	2.35	1.78
2	500.00	213.80	994.00	280.20	489.70	500.00	2.23	2.27	2.34	2.06
3	500.00	213.80	998.00	284.20	492.50	500.00	2.28	2.32	2.36	1.50
						Prom	2.25	2.30	2.35	1.78

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.6. Determinación del equivalente de arena (ASTM D2419)

Tabla 3.14 Equivalente de arena

N° de muestra	H1 (cm)	H2 (cm)	Equivalente de arena (%)
1	10.6	11.4	92.98
2	10.3	11.3	90.99
3	10.5	11.4	92.27
		Prom	92.08
		Equivalente de arena (%)	Norma
		92.08	> 50%

Fuente: Elaboración propia

**3.1.2.7. Determinación el desgaste mediante la máquina de Los Ángeles
(ASTM E 131 AASHTO T96-99)**

Tabla 3.15 Determinación del desgaste mediante la máquina de Los Ángeles

Gradación A		Gradación B		Gradación C		Gradación D	
Tamiz	P. ret.	Tamiz	P. ret.	Tamiz	P. ret.	Tamiz	P. ret.
1"	1233.6	1/2"	2500.9	1/4"	2500.6	N°8	-
3/4"	1251.5	3/8"	2500.5	N°4	2500.2		
1/2"	1251.3						
3/8"	1251.8						
Suma	4988.2	5001.4		5000.8		-	
Máx	5001.4	→ Gradación B					
	Material	(mi)	(mf)	% de desgaste		ASTM	
	B	5001.4	3832.6	23.37%		35% MAX	

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.8. Análisis de la caracterización de agregados

Los agregados pétreos alcanzaron un límite líquido de 22, índice de plasticidad de 6.57, equivalente de arena de 92.08% y el desgaste mediante la máquina de Los Ángeles de 23.37%, cada uno de estos valores se encuentran dentro de los requisitos para el Diseño de Mezclas Asfálticas Marshall, como se puede observar líneas arriba en las Tablas 10, 11, 15 y 16 respectivamente.

3.2. ELABORACIÓN DE CURVAS GRANULOMÉTRICAS

A continuación, se presentarán once curvas granulométricas diferentes, dentro y fuera de la Banda TM-40c, banda que establece los límites de granulometría para agregados pétreos a usarse en capas de rodadura, establecidos en la Norma Boliviana.

Además, se mostrará el rango de requerimientos pétreos según el Tamaño Máximo Nominal para carpetas asfálticas de granulometría densa, para cualquier valor de ΣL (ΣL = Número de equivalentes de 8.2 t, esperado durante la vida útil del pavimento).

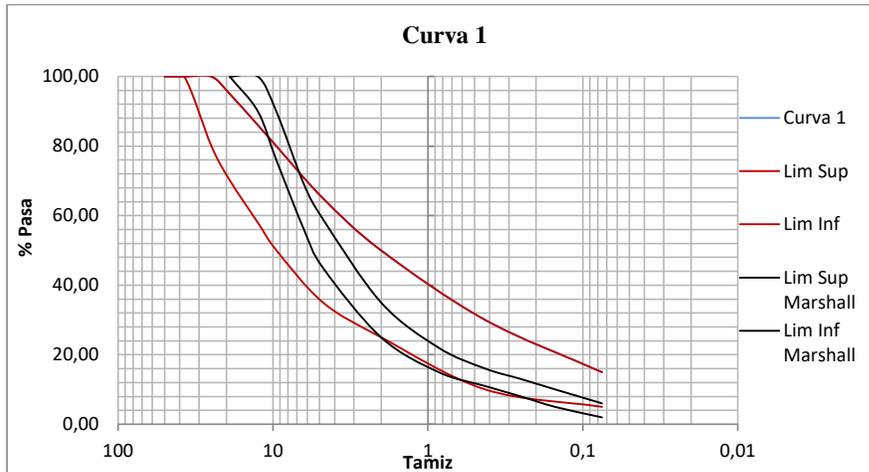
3.2.1. Curva 1 (Curva extremo superior de la Banda TM-40c)

Tabla 3.16 Curva 1

Tamices	Tamaño	Curva 1
	(mm)	
		Lim sup
2"	50	100.00
1 1/2"	37.50	100.00
1"	25.00	100.00
3/4"	19	95.00
1/2"	12.5	86.00
3/8"	9.50	80.00
Nº4	4.75	65.00
Nº10	2.00	50.00
Nº40	0.425	30.00
Nº200	0.075	15.00
TMA		1"
TMN		3/4"

Fuente: Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia

Gráfico 3.5 Curva 1



Fuente: Elaboración propia

La curva 1 es netamente el límite superior de la Banda TM-40c, como se puede observar el gráfico la curva 1 no cumple los límites para el diseño Marshall, pues los porcentajes de agregados fino y el Filler están muy por encima de lo establecido.

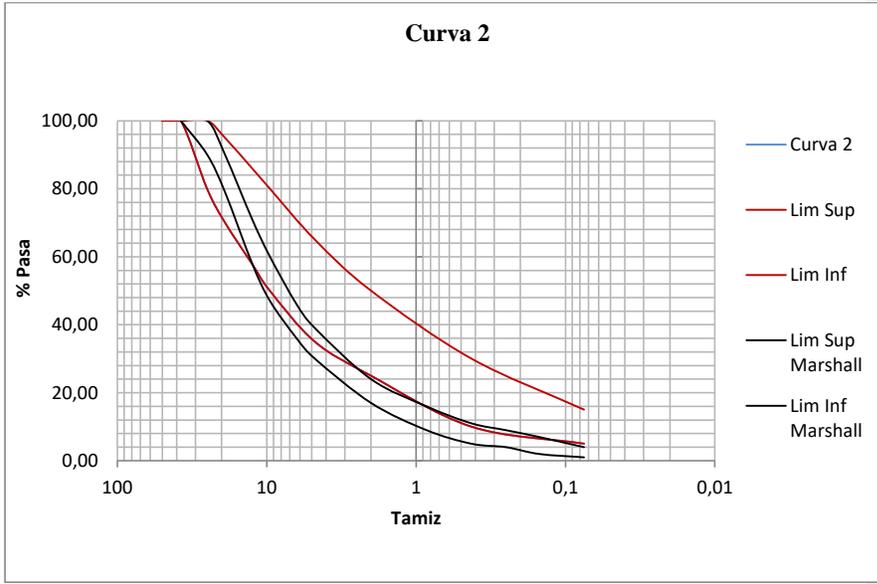
3.2.2. Curva 2 (Curva extremo inferior de la Banda TM-40c)

Tabla 3.17 Curva 2

Tamices	Tamaño	Curva 2
	(mm)	
		Lim inf
2"	50	100.00
1 1/2"	37.50	100.00
1"	25.00	80.00
3/4"	19	70.10
1/2"	12.5	57.90
3/8"	9.50	50.00
Nº4	4.75	35.00
Nº10	2.00	25.00
Nº40	0.425	10.00
Nº200	0.075	5.00
TMA		1 1/2"
TMN		1 1/2"

Fuente: Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia

Gráfico 3.6 Curva 2



Fuente: Elaboración propia

La curva 2 es netamente el límite inferior de la Banda TM-40c, esta curva se encuentra dentro del rango en casi un 60% como se puede apreciar en la gráfica, pues el agregado grueso está por debajo de los requerimientos.

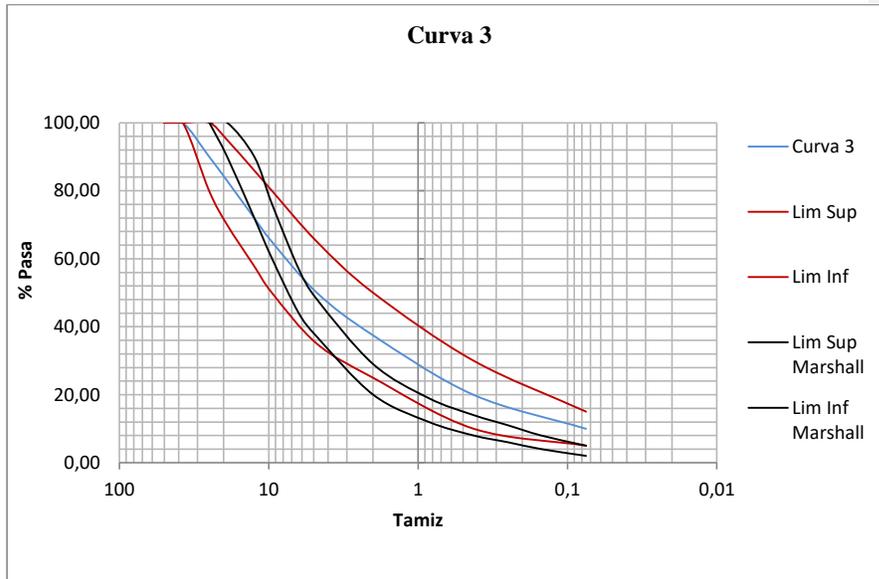
3.2.3. Curva 3 (Curva media de la Banda TM-40c)

Tabla 3.18 Curva 3

Tamices	Tamaño	Curva 3
	(mm)	
		Central
2"	50	100.00
1 1/2"	37.50	100.00
1"	25.00	90.00
3/4"	19	83.00
1/2"	12.5	72.00
3/8"	9.50	65.00
N°4	4.75	50.00
N°10	2.00	37.50
N°40	0.425	20.00
N°200	0.075	10.00
TMA		1 1/2"
TMN		1"

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.7 Curva 3



Fuente: Elaboración propia

La curva 3 es el promedio aritmético entre la curva 1 y curva 2, se localiza en su mayoría fuera del rango Marshall, pues presenta menos agregado grueso y por demás fino de lo solicitado.

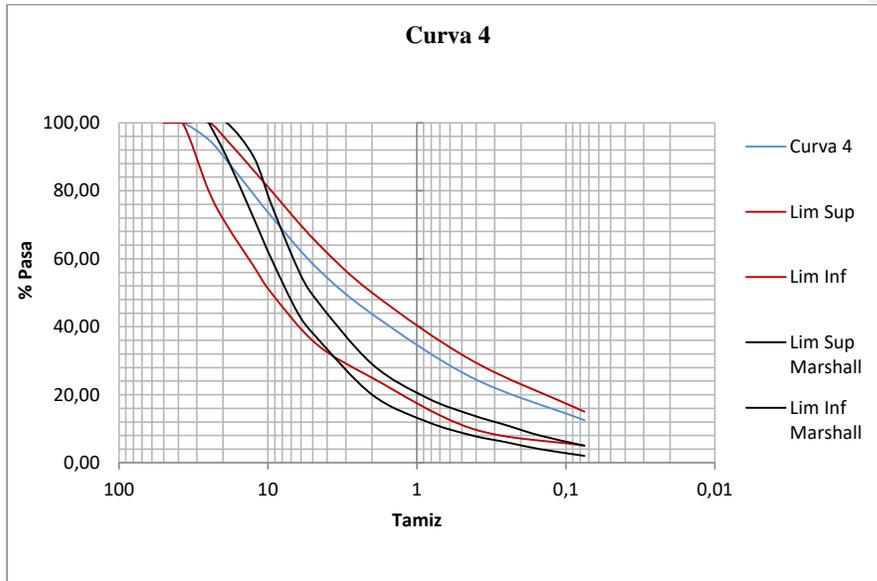
3.2.4. Curva 4

Tabla 3.19 Curva 4

Tamices	Tamaño	Curva 4
	(mm)	
2"	50	100.00
1 1/2"	37.50	100.00
1"	25.00	95.00
3/4"	19	89.00
1/2"	12.5	79.00
3/8"	9.50	72.50
N°4	4.75	57.50
N°10	2.00	43.75
N°40	0.425	25.00
N°200	0.075	12.50
TMA		1 1/2"
TMN		1"

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.8 Curva 4



Fuente: Elaboración propia

La curva 4 es el promedio aritmético entre la curva 1 y la curva 3, esta curva tampoco se encuentra dentro de los parámetros Marshall, su contenido de material fino es mucho más alto de lo requerido.

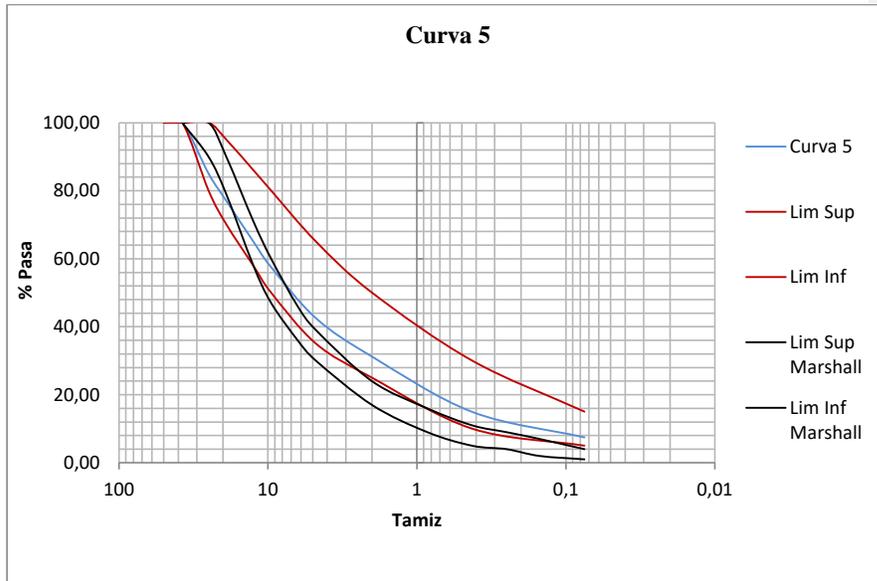
3.2.5. Curva 5

Tabla 3.20 Curva 5

Tamices	Tamaño	Curva 5
	(mm)	
2"	50	100.00
1 1/2"	37.50	100.00
1"	25.00	85.00
3/4"	19	77.00
1/2"	12.5	65.00
3/8"	9.50	57.50
N°4	4.75	42.50
N°10	2.00	31.25
N°40	0.425	15.00
N°200	0.075	7.50
TMA		1 1/2"
TMN		1 1/2"

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.9 Curva 5



Fuente: Elaboración propia

La curva 5 es el promedio aritmético entre la curva 2 y la curva 3, el agregado grueso se encuentra en el límite de los requerimientos Marshall o por debajo por pequeños porcentajes, en cambio en la parte fina lo sobrepasa con porcentajes igual pequeños, menores al cinco por ciento.

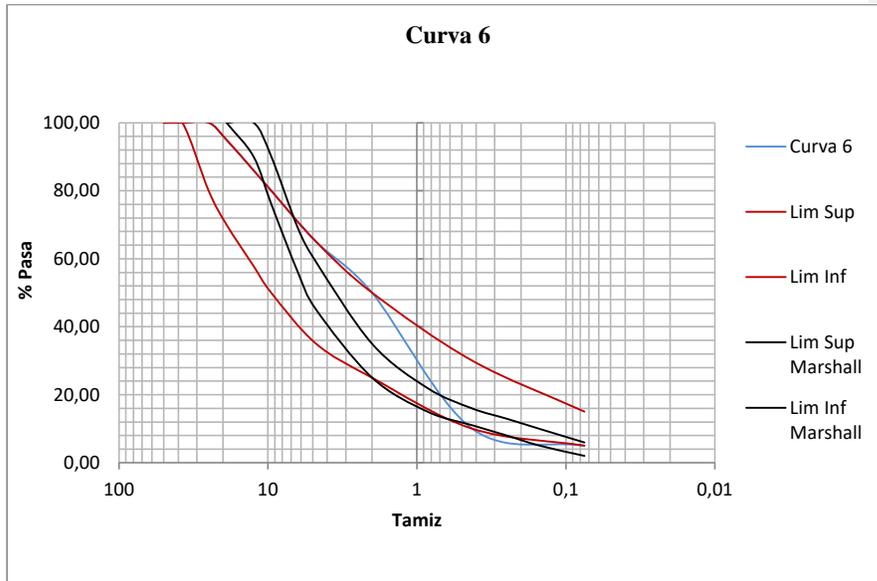
3.2.6. Curva 6

Tabla 3.21 Curva 6

Tamices	Tamaño	Curva 6
	(mm)	
2"	50	100.00
1 1/2"	37.50	100.00
1"	25.00	100.00
3/4"	19	95.00
1/2"	12.5	86.00
3/8"	9.50	80.00
N°4	4.75	65.00
N°10	2.00	50.00
N°40	0.425	10.00
N°200	0.075	5.00
TMA		1"
TMN		3/4"

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.10 Curva 6



Fuente: Elaboración propia

La curva 6 es la combinación del 50% inicial del límite superior, es decir de la curva 1 y hace un salto a la curva 2 en el 50% final de lo que pasa; esta curva tiene una marcada discontinuidad, lo que provoca que esté fuera de los parámetros Marshall, en la zona central tiene porcentajes más altos de los requeridos y al final están por debajo.

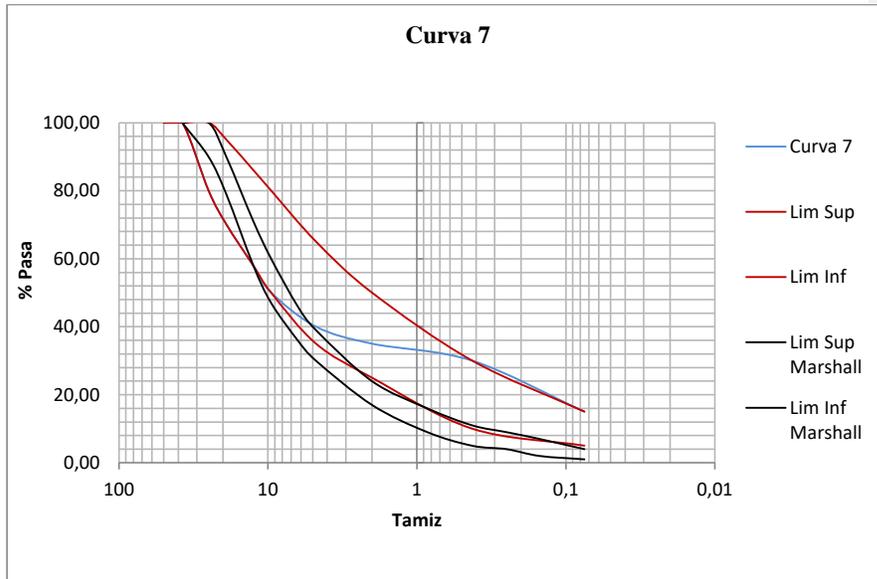
3.2.7. Curva 7

Tabla 3.22 Curva 7

Tamices	Tamaño	Curva 7
	(mm)	
2"	50	100.00
1 1/2"	37.50	100.00
1"	25.00	80.00
3/4"	19	70.10
1/2"	12.5	57.90
3/8"	9.50	50.00
N°4	4.75	65.00
N°10	2.00	50.00
N°40	0.425	30.00
N°200	0.075	15.00
TMA		1 1/2"
TMN		1 1/2"

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.11 Curva 7



Fuente: Elaboración propia

La curva 7 es lo opuesto a la curva 6, pues es la combinación del 50% inicial de la curva 2 y hace un salto a la curva 1 en el 50% final de lo que pasa, al igual que la curva anterior tiene una vistosa discontinuidad, contiene agregado fino en demasía.

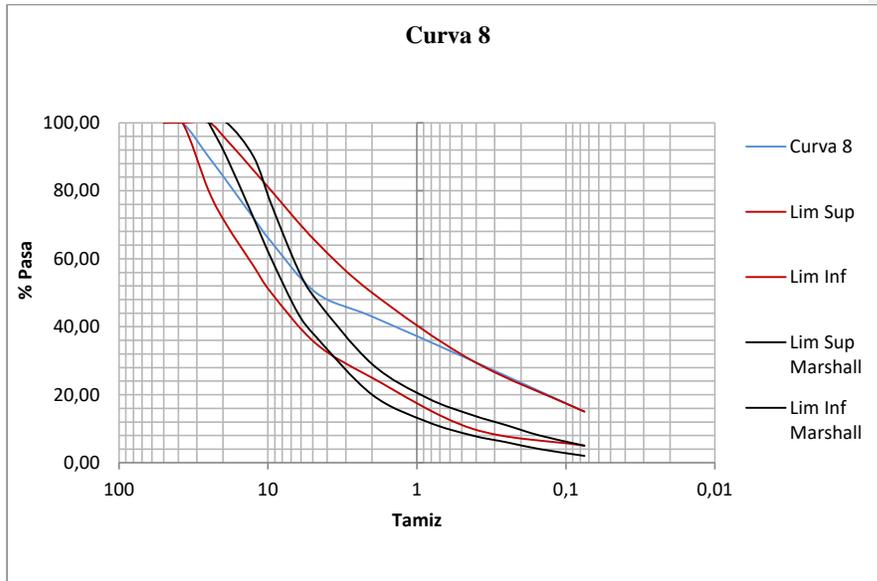
3.2.8. Curva 8

Tabla 3.23 Curva 8

Tamices	Tamaño	Curva 8
	(mm)	
2"	50	100.00
1 1/2"	37.50	100.00
1"	25.00	90.00
3/4"	19	83.00
1/2"	12.5	72.00
3/8"	9.50	65.00
N°4	4.75	50.00
N°10	2.00	43.00
N°40	0.425	30.00
N°200	0.075	15.00
TMA		1 1/2"
TMN		1"

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.12 Curva 8



Fuente: Elaboración propia

La curva 8 es la combinación del 50% inicial de la curva 3 y hace un salto a la curva 1 en el 50% final de lo que pasa, como se puede apreciar en el gráfico esta curva presenta una discontinuidad ligera, por lo que el material fino tiene porcentajes mas altos de los solicitados por el rango Marshall.

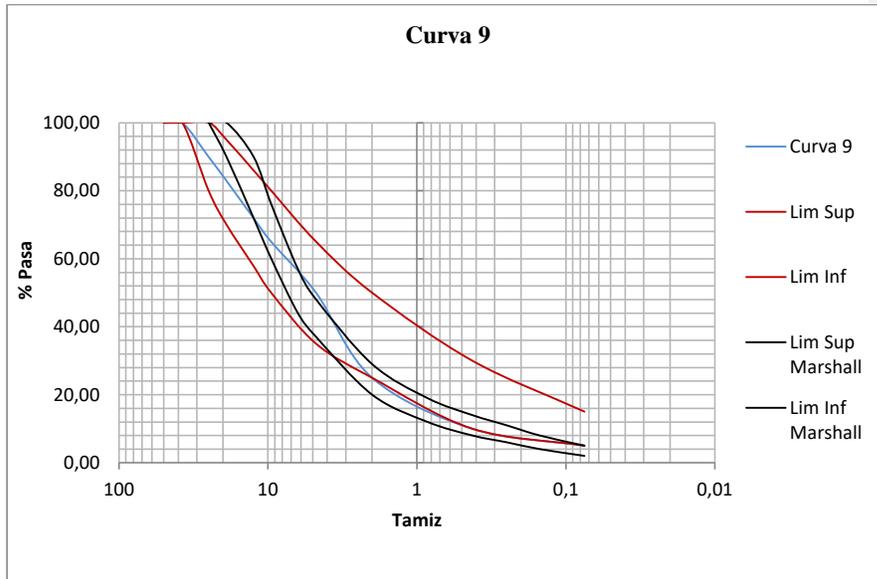
3.2.9. Curva 9

Tabla 3.24 Curva 9

Tamices	Tamaño	Curva 9
	(mm)	
2"	50	100.00
1 1/2"	37.50	100.00
1"	25.00	90.00
3/4"	19	83.00
1/2"	12.5	72.00
3/8"	9.50	65.00
N°4	4.75	50.00
N°10	2.00	25.00
N°40	0.425	10.00
N°200	0.075	5.00
TMA		1 1/2"
TMN		1"

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.13 Curva 9



Fuente: Elaboración propia

La curva 9 es la combinación del 50% inicial de la curva 3 y hace un salto a la curva 2 en el 50% final de lo que pasa; en esta curva aproximadamente el 20% inicial de la curva presenta una deficiencia de agregado grueso, el resto de la curva se encuentra en los límites Marshall. Por lo que se adoptará esta curva como modelo para comparar con el resto de las curvas, las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas.

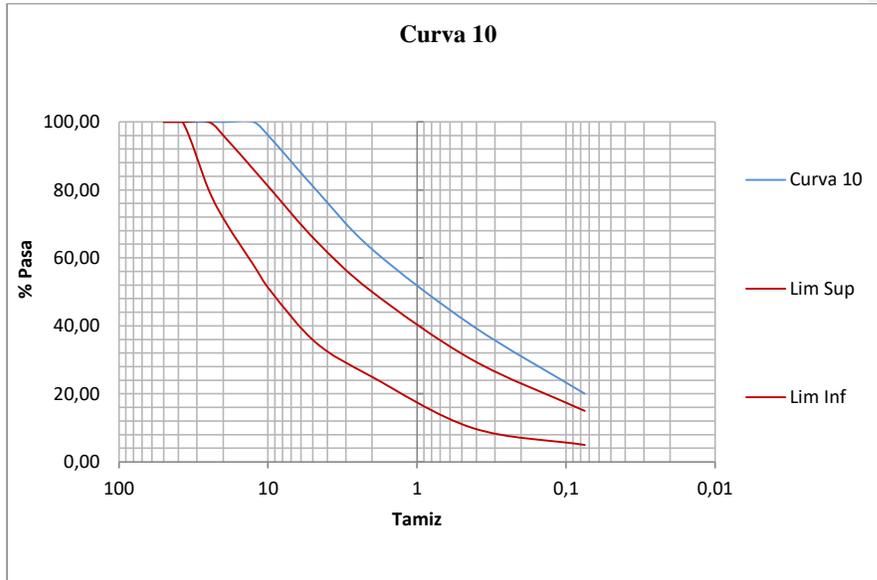
3.2.10. Curva 10

Tabla 3.25 Curva 10

Tamices	Tamaño	Curva 10
	(mm)	
2"	50	100.00
1 1/2"	37.50	100.00
1"	25.00	100.00
3/4"	19	100.00
1/2"	12.5	100.00
3/8"	9.50	95.00
N°4	4.75	80.00
N°10	2.00	62.50
N°40	0.425	40.00
N°200	0.075	20.00
TMA	1/2"	
TMN	3/8"	

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.14 Curva 10



Fuente: Elaboración propia

La curva 10 presenta un rango fuera de los límites de la Banda TM-40c, este rango es equivalente a la distancia entre el límite superior y la curva media (Curva 3); esta curva no presenta los límites de requerimientos Marshall pues los rangos son solo hasta un Tamaño Máximo Nominal de 1/2".

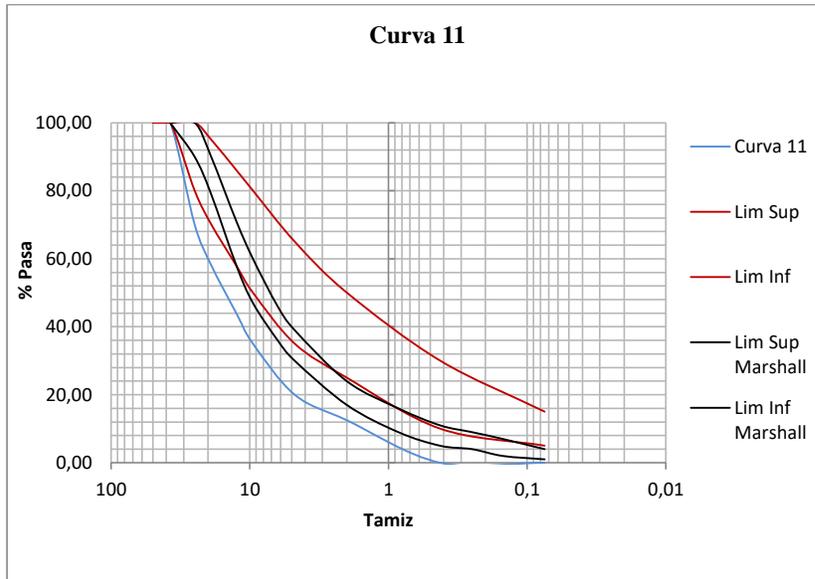
3.2.11. Curva 11

Tabla 3.26 Curva 11

Tamices	Tamaño	Curva 11
	(mm)	
2"	50	100.00
1 1/2"	37.50	100.00
1"	25.00	70.00
3/4"	19	58.10
1/2"	12.5	43.90
3/8"	9.50	35.00
Nº4	4.75	20.00
Nº10	2.00	12.50
Nº40	0.425	0.00
Nº200	0.075	0.00
TMA		1 1/2"
TMN		1 1/2"

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.15 Curva 11



Fuente: Elaboración propia

La curva 11 presenta un rango fuera de los límites de la Banda TM-40c, este rango es equivalente a la distancia entre el límite inferior y la curva media (Curva 3); esta curva está por completo debajo de las solicitudes Marshall, casi de forma paralela, lo que significa una distribución similar a la requerida, pero con porcentajes más bajos.

3.2.12. Resumen de curvas

En la siguiente tabla se presentan todas las curvas granulométricas, ubicadas dentro (Curvas 1-9) y fuera (Curvas 10 y 11), de la Banda TM.40c establecida en la norma boliviana.

Tabla 3.27 Resumen de elaboración de curvas

Tamices		C - 1	C - 2	C - 3	C - 4	C - 5	C - 6	C - 7	C - 8	C - 9	C - 10	C - 11
	(mm)											
		Lim sup	Lim inf	Central	Dentro de la franja						Fuera de la franja	
2"	50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1 1/2"	37.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1"	25.00	100.00	80.00	90.00	95.00	85.00	100.00	80.00	90.00	90.00	100.00	70.00
3/4"	19	95.00	70.10	83.00	89.00	77.00	95.00	70.10	83.00	83.00	100.00	58.10
1/2"	12.5	86.00	57.90	72.00	79.00	65.00	86.00	57.90	72.00	72.00	100.00	43.90
3/8"	9.50	80.00	50.00	65.00	72.50	57.50	80.00	50.00	65.00	65.00	95.00	35.00
Nº4	4.75	65.00	35.00	50.00	57.50	42.50	65.00	40.00	50.00	50.00	80.00	20.00
Nº10	2.00	50.00	25.00	37.50	43.75	31.25	50.00	35.00	43.00	25.00	62.50	12.50
Nº40	0.425	30.00	10.00	20.00	25.00	15.00	10.00	30.00	30.00	10.00	40.00	0.00
Nº200	0.075	15.00	5.00	10.00	12.50	7.50	5.00	15.00	15.00	5.00	20.00	0.00
	TMA	1"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	1"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	1/2"	1 1/2"

	TMN	3/4"	1 1/2"	1"	1"	1 1/2"	3/4"	1 1/2"	1"	1"	3/8"	1 1/2"
--	-----	------	--------	----	----	--------	------	--------	----	----	------	--------

Fuente: Elaboración propia

3.3. CÁLCULO DEL CONTENIDO INICIAL DE CEMENTO ASFÁLTICO

El contenido inicial de cemento asfáltico se calculará con los Métodos de la SAHOP y el Método del Instituto del Asfalto, el valor adoptado será el promedio aritmético entre ambos resultados.

Tabla 3.28 Contenido inicial de cemento asfáltico

Método de la Sahop – México o método del Área Superficial											
	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10	C-11
G (%)=	30.00	35.10	33.00	31.50	34.50	30.00	30.10	33.00	33.00	20.00	38.10
g (%)=	35.00	25.00	30.00	32.50	27.50	55.00	10.00	20.00	40.00	40.00	20.00
A (%)=	15.00	5.00	10.00	12.50	7.50	5.00	15.00	15.00	5.00	20.00	0.00
F (%)=	15.00	5.00	10.00	12.50	7.50	5.00	15.00	15.00	5.00	20.00	0.00
n =	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
CA (%) =	7.80	2.86	5.33	6.57	4.10	3.28	7.44	7.59	3.07	10.25	0.40
CA (%) =	7.24	2.78	5.06	6.16	3.94	3.18	6.93	7.06	2.98	9.29	0.39
Instituto del Asfalto (USA)											
a (%)=	50.00	75.00	62.50	56.25	68.75	50.00	65.00	57.00	75.00	37.50	87.50
b (%)=	35.00	20.00	27.50	31.25	23.75	45.00	20.00	28.00	20.00	42.50	12.50
c (%)=	15.00	5.00	10.00	12.50	7.50	5.00	15.00	15.00	5.00	20.00	0.00
n (%)=	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
K =	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

CA (%) =	6.88	5.00	5.94	6.41	5.47	5.33	6.68	6.78	5.00	7.81	4.06
CA (%) Prom =	7.06	3.89	5.50	6.28	4.70	4.25	6.80	6.92	3.99	8.55	4.00

Fuente: Elaboración propia

3.4. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL

El diseño de las probetas asfálticas mediante el Método Marshall se realizó a partir del promedio de tres ensayos, es decir tres probetas por cada porcentaje de cemento asfáltico, de cada tipo de curva.

Estos porcentajes de cemento asfáltico se establecieron a partir del contenido uncial calculado, se sumará y restará 0.5% y 1% a cada porcentaje, para obtener los restantes cuatro puntos de las curvas de relación de vacíos en el árido mineral, porcentaje de huecos de aire, densidad, fluencia y estabilidad, que permiten seleccionar el contenido óptimo de Cemento Asfáltico para cada combinación granulométrica

3.4.1. Curva 1

Tabla 3.29 Curva 1, % de CA

Tamices		% CA =			Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
Tamaño (mm)	% Pasa	% Retenido acum	% retenido	Peso retenido (g)					
2"	50	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1 1/2"	37.5	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1"	25	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/4"	19	95.00	5.00	5.00	56.40	56.10	55.80	55.50	55.20
1/2"	12.5	86.00	14.00	9.00	101.52	100.98	100.44	99.9	99.36
3/8"	9.5	80.00	20.00	6.00	67.68	67.32	66.96	66.60	66.24
Nº4	4.75	65.00	35.00	15.00	169.20	168.30	167.40	166.50	165.60
Nº10	2	50.00	50.00	15.00	169.20	168.30	167.40	166.50	165.60
Nº40	0.425	30.00	70.00	20.00	225.60	224.40	223.20	222	220.80
Nº200	0.075	15.00	85.00	15.00	169.20	168.30	167.40	166.50	165.60
BASE			100.00	15.00	169.20	168.30	167.40	166.50	165.60
TMN	37.5		Total agregado (g) =		1128.00	1122.00	1116.00	1110.00	1104.00
			Peso total probeta (g) =		1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Curva 2

Tabla 3.30 Curva 2, % de CA

Tamices					Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	
				% CA =	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	
	Tamaño (mm)	% Pasa	% Retenido acum	% retenido	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	
2"	50	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1 1/2"	37.5	80.00	20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1"	25	70.10	29.90	20.00	232.80	231.60	230.40	229.20	228.00	
3/4"	19	57.90	42.10	9.90	115.24	114.64	114.05	113.45	112.86	
1/2"	12.5	50.00	50.00	12.20	142.01	141.28	140.54	139.81	139.08	
3/8"	9.5	35.00	65.00	7.90	91.96	91.48	91.01	90.53	90.06	
Nº4	4.75	25.00	75.00	15.00	174.60	173.70	172.80	171.90	171.00	
Nº10	2	10.00	90.00	10.00	116.40	115.80	115.20	114.60	114.00	
Nº40	0.425	5.00	95.00	15.00	174.60	173.70	172.80	171.90	171.00	
Nº200	0.075		100.00	5.00	58.20	57.90	57.60	57.30	57.00	
BASE			0.00	5.00	58.20	57.90	57.60	57.30	57.00	
TMN	37.5				Total agregado (g) =	1164.00	1158.00	1152.00	1146.00	1140.00
					Peso total probeta (g) =	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Curva 3

Tabla 3.31 Curva 3, % de CA

Tamices					Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
				% CA =	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
	Tamaño (mm)	% Pasa	% Retenido acum	% retenido	Peso retenido (g)				
2"	50	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1 1/2"	37.5	90.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1"	25	83.00	17.00	10.00	114.60	114.00	113.40	112.80	112.20
3/4"	19	72.00	28.00	7.00	80.22	79.80	79.38	78.96	78.54
1/2"	12.5	65.00	35.00	11.00	126.06	125.40	124.74	124.08	123.42
3/8"	9.5	50.00	50.00	7.00	80.22	79.80	79.38	78.96	78.54
Nº4	4.75	37.50	62.50	15.00	171.90	171.00	170.10	169.20	168.30
Nº10	2	20.00	80.00	12.50	143.25	142.50	141.75	141.00	140.25
Nº40	0.425	10.00	90.00	17.50	200.55	199.50	198.45	197.40	196.35
Nº200	0.075		100.00	10.00	114.60	114.00	113.40	112.80	112.20
BASE			0.00	10.00	114.60	114.00	113.40	112.80	112.20
TMN	37.5		Total agregado (g) =		1146.00	1140.00	1134.00	1128.00	1122.00
			Peso total probeta (g) =		1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

3.4.4. Curva 4

Tabla 3.32 Curva 4, % de CA

Tamices					Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	
				% CA =	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50	
	Tamaño (mm)	% Pasa	% Retenido acum	% retenido	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	
2"	50	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1 1/2"	37.5	95.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1"	25	89.00	11.00	5.00	56.70	56.40	56.10	55.80	55.50	
3/4"	19	79.00	21.00	6.00	68.04	67.68	67.32	66.96	66.60	
1/2"	12.5	72.50	27.50	10.00	113.40	112.80	112.20	111.60	111.00	
3/8"	9.5	57.50	42.50	6.50	73.71	73.32	72.93	72.54	72.15	
Nº4	4.75	43.75	56.25	15.00	170.10	169.20	168.30	167.40	166.50	
Nº10	2	25.00	75.00	13.75	155.93	155.10	154.28	153.45	152.63	
Nº40	0.425	12.50	87.50	18.75	212.63	211.50	210.38	209.25	208.13	
Nº200	0.075		100.00	12.50	141.75	141.00	140.25	139.50	138.75	
BASE			0.00	12.50	141.75	141.00	140.25	139.50	138.75	
TMN	37.5				Total agregado (g) =	1134.00	1128.00	1122.00	1116.00	1110.00
					Peso total probeta (g) =	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

3.4.5. Curva 5

Tabla 3.33 Curva 5, % de CA

Tamices				Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
Tamaño (mm)	% Pasa	% Retenido acum	% CA =	Peso retenido (g)				
2"	50	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1 1/2"	37.5	85.00	15.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1"	25	77.00	23.00	15.00	172.80	171.90	171.00	170.10
3/4"	19	65.00	35.00	8.00	92.16	91.68	91.20	90.72
1/2"	12.5	57.50	42.50	12.00	138.24	137.52	136.80	136.08
3/8"	9.5	42.50	57.50	7.50	86.40	85.95	85.50	85.05
Nº4	4.75	31.25	68.75	15.00	172.80	171.90	171.00	170.10
Nº10	2	15.00	85.00	11.25	129.60	128.93	128.25	127.58
Nº40	0.425	7.50	92.50	16.25	187.20	186.23	185.25	184.28
Nº200	0.075		100.00	7.50	86.40	85.95	85.50	85.05
BASE			0.00	7.50	86.40	85.95	85.50	85.05
TMN	37.5							
Total agregado (g) =				1152.00	1146.00	1140.00	1134.00	1128.00
Peso total probeta (g) =				1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

3.4.6. Curva 6

Tabla 3.34 Curva 6, % de CA

Tamices					Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	
				% CA =	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	
	Tamaño (mm)	% Pasa	% Retenido acum	% retenido	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	
2"	50	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1 1/2"	37.5	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1"	25	95.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	170.10	
3/4"	19	86.00	14.00	5.00	57.90	57.60	57.30	57.00	90.72	
1/2"	12.5	80.00	20.00	9.00	104.22	103.68	103.14	102.60	136.08	
3/8"	9.5	65.00	35.00	6.00	69.48	69.12	68.76	68.40	85.05	
Nº4	4.75	50.00	50.00	15.00	173.70	172.80	171.90	171.00	170.10	
Nº10	2	10.00	90.00	15.00	173.70	172.80	171.90	171.00	127.58	
Nº40	0.425	5.00	95.00	40.00	463.20	460.80	458.40	456.00	184.28	
Nº200	0.075		100.00	5.00	57.90	57.60	57.30	57.00	85.05	
BASE			0.00	5.00	57.90	57.60	57.30	57.00	85.05	
TMN	37.5				Total agregado (g) =	1158.00	1152.00	1146.00	1140.00	1134.00
					Peso total probeta (g) =	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

3.4.7. Curva 7

Tabla 3.35 Curva 7, % de CA

Tamices					Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	
				% CA =	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	
	Tamaño (mm)	% Pasa	% Retenido acum	% retenido	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	
2"	50	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1 1/2"	37.5	80.00	20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1"	25	70.10	29.90	20.00	225.60	224.40	223.20	222.00	220.80	
3/4"	19	57.90	42.10	9.90	111.67	111.08	110.48	109.89	109.30	
1/2"	12.5	50.00	50.00	12.20	137.62	136.88	136.15	135.42	134.69	
3/8"	9.5	40.00	60.00	7.90	89.11	88.64	88.16	87.69	87.22	
Nº4	4.75	35.00	65.00	10.00	112.80	112.20	111.60	111.00	110.40	
Nº10	2	30.00	70.00	5.00	56.40	56.10	55.80	55.50	55.20	
Nº40	0.425	15.00	85.00	5.00	56.40	56.10	55.80	55.50	55.20	
Nº200	0.075		100.00	15.00	169.20	168.30	167.40	166.50	165.60	
BASE			0.00	15.00	169.20	168.30	167.40	166.50	165.60	
TMN	37.5				Total agregado (g) =	1128.00	1122.00	1116.00	1110.00	1104.00
					Peso total probeta (g) =	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

3.4.8. Curva 8

Tabla 3.36 Curva 8, % de CA

Tamices					Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	
				% CA =	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	
	Tamaño (mm)	% Pasa	% Retenido acum	% retenido	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	Peso retenido (g)	
2"	50	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1 1/2"	37.5	90.00	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1"	25	83.00	17.00	10.00	112.80	112.20	111.60	111.00	110.40	
3/4"	19	72.00	28.00	7.00	78.96	78.54	78.12	77.70	77.28	
1/2"	12.5	65.00	35.00	11.00	124.08	123.42	122.76	122.10	121.44	
3/8"	9.5	50.00	50.00	7.00	78.96	78.54	78.12	77.70	77.28	
Nº4	4.75	44.00	56.00	15.00	169.20	168.30	167.40	166.50	165.60	
Nº10	2	30.00	70.00	6.00	67.68	67.32	66.96	66.60	66.24	
Nº40	0.425	15.00	85.00	14.00	157.92	157.08	156.24	155.40	154.56	
Nº200	0.075		100.00	15.00	169.20	168.30	167.40	166.50	165.60	
BASE			0.00	15.00	169.20	168.30	167.40	166.50	165.60	
TMN	37.5				Total agregado (g) =	1128.00	1122.00	1116.00	1110.00	1104.00
					Peso total probeta (g) =	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

3.4.9. Curva 9

Tabla 3.37 Curva 9, % de CA

Tamices				Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	
			% CA =	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	
	Tamaño (mm)	% Pasa	% Retenido acum	% retenido	Peso retenido (g)				
2"	50	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1 1/2"	37.5	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1"	25	90.00	10.00	10.00	116.40	115.80	115.20	114.60	114.00
3/4"	19	83.00	17.00	7.00	81.48	81.06	80.64	80.22	79.80
1/2"	12.5	72.00	28.00	11.00	128.04	127.38	126.72	126.06	125.40
3/8"	9.5	65.00	35.00	7.00	81.48	81.06	80.64	80.22	79.80
Nº4	4.75	50.00	50.00	15.00	174.60	173.70	172.80	171.90	171.00
Nº10	2	25.00	75.00	25.00	291.00	289.50	288.00	286.50	285.00
Nº40	0.425	10.00	90.00	15.00	174.60	173.70	172.80	171.90	171.00
Nº200	0.075		95.00	5.00	58.20	57.90	57.60	57.30	57.00
BASE			100.00	5.00	58.20	57.90	57.60	57.30	57.00
TMN	37.5		Total agregado (g) =		1164.00	1158.00	1152.00	1146.00	1140.00
			Peso total probeta (g) =		1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

3.4.10. Curva 10

Tabla 3.38 Curva 10, % de CA

Tamices				Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	
			% CA =	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	
	Tamaño (mm)	% Pasa	% Retenido acum	% retenido	Peso retenido (g)				
2"	50	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1 1/2"	37.5	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1"	25	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/4"	19	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1/2"	12.5	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/8"	9.5	95.00	5.00	5.00	55.20	54.90	54.60	54.30	54.00
Nº4	4.75	80.00	20.00	15.00	165.60	164.70	163.80	162.90	162.00
Nº10	2	62.50	37.50	17.50	193.20	192.15	191.10	190.05	189.00
Nº40	0.425	40.00	60.00	22.50	248.40	247.05	245.70	244.35	243.00
Nº200	0.075		80.00	20.00	220.80	219.60	218.40	217.20	216.00
BASE			100.00	20.00	220.80	219.60	218.40	217.20	216.00
TMN	37.5		Total agregado (g) =		1104.00	1098.00	1092.00	1086.00	1080.00
			Peso total probeta (g) =		1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

3.4.11. Curva 11

Tabla 3.39 Curva 11, % de CA

Tamices					Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
	Tamaño (mm)	% Pasa	% Retenido acum	% CA =	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
				% retenido	Peso retenido (g)				
2"	50	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1 1/2"	37.5	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1"	25	70.00	30.00	30.00	349.20	347.40	345.60	343.80	342.00
3/4"	19	58.10	41.90	11.90	138.52	137.80	137.09	136.37	135.66
1/2"	12.5	43.90	56.10	14.20	165.29	164.44	163.58	162.73	161.88
3/8"	9.5	35.00	65.00	8.90	103.60	103.06	102.53	101.99	101.46
Nº4	4.75	20.00	80.00	15.00	174.60	173.70	172.80	171.90	171.00
Nº10	2	12.50	87.50	7.50	87.30	86.85	86.40	85.95	85.50
Nº40	0.425	0.00	100.00	12.50	145.50	144.75	144.00	143.25	142.50
Nº200	0.075	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BASE			100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TMN	37.5			Total agregado (g) =	1164.00	1158.00	1152.00	1146.00	1140.00
				Peso total probeta (g) =	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00

Fuente: Elaboración propia

3.4.12. Resumen de los porcentajes de CA y agregados de cada tipo de granulometría

Tabla 3.40 Resumen Curva 1, Curva 2, Curva 3

	Curva 1					Curva 2					Curva 3				
	P 1	P2	P3	P4	P5	P 1	P2	P3	P4	P5	P 1	P2	P3	P4	P5
Porcentaje de Agregado (%)	94.0	93.5	93.0	92.5	92.0	97.0	96.5	96.0	95.5	95.0	95.5	95.0	94.5	94.0	93.5
Porcentaje del CA (%)	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
Peso total de la Probeta (gr)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Peso de Agregado (gr)	1128	1122	1116	1110	1104	1164	1158	1152	1146	1140	1146	1140	1134	1128	1122
Peso del CA (gr)	72	78	84	90	96	36	42	48	54	60	54	60	66	72	78

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.41 Resumen Curva 4, Curva 5, Curva 6

	Curva 4					Curva 5					Curva 6				
	P 1	P2	P3	P4	P5	P 1	P2	P3	P4	P5	P 1	P2	P3	P4	P5
Porcentaje de Agregado (%)	94.5	94.0	93.5	93.0	92.5	96.0	95.5	95.0	94.5	94.0	96.5	96.0	95.5	95.0	94.0
Porcentaje del CA (%)	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0
Peso total de la Probeta (gr)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Peso de Agregado (gr)	1134	1128	1122	1116	1110	1152	1146	1140	1134	1128	1158	1152	1146	1140	1128
Peso del CA (gr)	66	72	78	84	90	48	54	60	66	72	42	48	54	60	72

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.42 Resumen Curva 7, Curva 8, Curva 9

	Curva 7					Curva 8					Curva 9				
	P 1	P2	P3	P4	P5	P 1	P2	P3	P4	P5	P 1	P2	P3	P4	P5
Porcentaje de Agregado (%)	94.0	93.5	93.0	92.5	92.0	94.0	93.5	93.0	92.5	92.0	97.0	96.5	96.0	95.5	95.0
Porcentaje del CA (%)	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
Peso total de la Probeta (gr)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Peso de Agregado (gr)	1128	1122	1116	1110	1104	1128	1122	1116	1110	1104	1164	1158	1152	1146	1140
Peso del CA (gr)	72	78	84	90	96	72	78	84	90	96	36	42	48	54	60

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.43 Resumen Curva 10, Curva 11

	Curva 10					Curva 11				
	P 1	P2	P3	P4	P5	P 1	P2	P3	P4	P5
Porcentaje de Agregado (%)	92.0	91.5	91.0	90.5	90.0	97.0	96.5	96.0	95.5	95.0
Porcentaje del CA (%)	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
Peso total de la Probeta (gr)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Peso de Agregado (gr)	1104	1098	1092	1086	1080	1164	1158	1152	1146	1140
Peso del CA (gr)	96	102	108	114	120	36	42	48	54	60

Fuente: Elaboración propia

3.4.13. Determinación de la densidad real, Vacíos en el Agregado Mineral (VAM), Vacíos de aire (Va) y Vacíos Llenos de asfalto (VLL)

Datos iniciales:

Tabla 3.44 Datos para densidad real, VAM, Va, VLL

Marshall 1					Marshall 2					Marshall 3				
N° de prob	Alt de prob.	Peso probeta			N° de Prob	Alt de prob.	Peso probeta			N° de prob	Alt de prob.	Peso probeta		
		Seco	Sat. sup. seca	Sumerg en agua			seco	Sat. sup. seca	Sumerg en agua			Seco	Sat. sup. seca	Sumerg en agua
	cm	gr.	gr.	gr.		cm	gr.	gr.	gr.		cm	gr.	gr.	gr.
1.1.1	6.50	1052.23	1112.45	631.75	1.2.1	6.70	1085.46	1147.58	651.70	1.3.1	7.32	1185.14	1252.97	711.55
1.1.2	6.25	1066.84	1109.13	631.28	1.2.2	6.45	1100.53	1144.15	651.21	1.3.2	7.04	1201.60	1249.23	711.02
1.1.3	5.96	1065.33	1105.80	630.80	1.2.3	6.14	1098.97	1140.72	650.72	1.3.3	6.71	1199.90	1245.48	710.48
1.1.4	6.00	1075.70	1118.25	634.84	1.2.4	6.19	1109.67	1153.56	654.89	1.3.4	6.76	1211.58	1259.50	715.03
1.1.5	6.31	1081.37	1129.74	638.88	1.2.5	6.51	1115.52	1165.42	659.05	1.3.5	7.10	1217.97	1272.44	719.58
2.1.1	6.20	867.82	925.40	507.30	2.2.1	6.40	895.23	954.62	523.32	2.3.1	6.99	977.44	1042.29	571.38
2.1.2	6.07	937.68	993.70	551.95	2.2.2	6.26	967.29	1025.08	569.38	2.3.2	6.84	1056.13	1119.22	621.67
2.1.3	5.80	1007.27	1062.01	596.60	2.2.3	5.99	1039.07	1095.54	615.44	2.3.3	6.54	1134.50	1196.15	671.96
2.1.4	5.83	1021.68	1081.62	606.58	2.2.4	6.01	1053.95	1115.78	625.73	2.3.4	6.56	1150.74	1218.25	683.20
2.1.5	6.20	1035.97	1101.24	616.55	2.2.5	6.40	1068.68	1136.02	636.02	2.3.5	6.99	1166.83	1240.34	694.43
3.1.1	6.01	1013.01	1101.15	632.23	3.2.1	6.20	1045.00	1135.92	652.19	3.3.1	6.77	1140.97	1240.24	712.09
3.1.2	6.37	1061.07	1117.34	642.91	3.2.2	6.57	1094.57	1152.63	663.22	3.3.2	7.17	1195.10	1258.48	724.12
3.1.3	6.40	1075.69	1133.54	653.60	3.2.3	6.61	1109.65	1169.34	674.24	3.3.3	7.21	1211.56	1276.72	736.16

Marshall 1				
N° de prob	Alt de prob.	Peso probeta		
		Seco	Sat. sup. seca	Sumerg en agua
	cm	gr.	gr.	gr.
3.1.4	6.11	1126.99	1164.42	661.44
3.1.5	6.68	1178.29	1195.29	669.28
4.1.1	6.10	1020.87	1111.07	630.09
4.1.2	6.20	1028.09	1111.86	632.34
4.1.3	6.08	1028.67	1112.64	634.60
4.1.4	5.95	1038.36	1124.09	635.79
4.1.5	6.41	1045.80	1135.06	636.98
5.1.1	5.70	1054.92	1109.70	628.43
5.1.2	6.14	1064.23	1114.59	633.41
5.1.3	6.21	1066.56	1119.48	638.40
5.1.4	5.90	1068.17	1129.93	636.74
5.1.5	6.52	1069.63	1140.38	635.08

Marshall 2				
N° de Prob	Alt de prob.	Peso probeta		
		seco	Sat. sup. seca	Sumerg en agua
	cm	gr.	gr.	gr.
3.2.4	6.30	1162.57	1201.19	682.33
3.2.5	6.89	1215.49	1233.04	690.41
4.2.1	6.29	1053.11	1146.16	649.99
4.2.2	6.39	1060.56	1146.97	652.31
4.2.3	6.28	1061.15	1147.78	654.64
4.2.4	6.14	1071.15	1159.59	655.87
4.2.5	6.62	1078.83	1170.90	657.09
5.2.1	5.88	1088.23	1144.74	648.27
5.2.2	6.34	1097.84	1149.79	653.42
5.2.3	6.41	1100.24	1154.83	658.56
5.2.4	6.08	1101.90	1165.61	656.85
5.2.5	6.72	1103.41	1176.39	655.13

Marshall 3				
N° de prob	Alt de prob.	Peso probeta		
		Seco	Sat. sup. seca	Sumerg en agua
	cm	gr.	gr.	gr.
3.3.4	6.88	1269.34	1311.50	744.99
3.3.5	7.52	1327.12	1346.27	753.82
4.3.1	6.87	1149.83	1251.42	709.68
4.3.2	6.98	1157.96	1252.30	712.22
4.3.3	6.85	1158.60	1253.18	714.76
4.3.4	6.70	1169.52	1266.08	716.10
4.3.5	7.22	1177.90	1278.44	717.44
5.3.1	6.42	1188.17	1249.87	707.81
5.3.2	6.92	1198.66	1255.38	713.42
5.3.3	7.00	1201.28	1260.89	719.04
5.3.4	6.64	1203.10	1272.66	717.17
5.3.5	7.34	1204.75	1284.43	715.30

Fuente: Elaboración propia

Utilizando el promedio aritmético de los datos anteriores, se obtuvo:

Tabla 3.45 Densidad real, VAM, Va, VLL

N° de probeta	Altura de probeta		% de asfalto		Densidad agregados			Peso probeta					Densidad probeta		Contenido de asfalto útil (Phu)	% de vacíos		
	cm	Base mezcla	Base agregados (Pb)	Densidad real seca de áridos (PRS)	Densidad efectiva del árido (PE)	% Asfalto absorbido (Pab)	Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua	Volumen	Aab < 2	Densidad real	Densidad máxima teórica (Dmm)	(V.A.M.)		% de huecos de aire (Va)	% de huecos llenos de Asfalto (VLL)	
		%										%	grs/cm³					grs/cm³
1.1	6.84	6.00	6.38	2.51	2.57	1.05	1107.61	1171.00	665.0	506.00	Usar el M. B	2.19	2.30	5.33	17.87	4.96	72.27	
1.2	6.58	6.50	6.95	2.51	2.57	1.05	1122.99	1167.50	664.5	503.00	Usar el M. B	2.23	2.29	5.90	16.68	2.41	85.55	
1.3	6.27	7.00	7.53	2.51	2.57	1.05	1121.40	1164.00	664.0	500.00	Usar el M. B	2.24	2.27	6.48	16.74	1.31	92.19	
1.4	6.32	7.50	8.11	2.51	2.57	1.05	1132.32	1177.10	668.3	508.85	Usar el M. B	2.23	2.26	7.06	17.84	1.43	91.98	
1.5	6.64	8.00	8.70	2.51	2.57	1.05	1138.29	1189.20	672.5	516.70	Usar el M. B	2.20	2.24	7.64	19.10	1.77	90.72	
2.1	6.53	3.00	3.09	2.49	2.58	1.46	913.50	974.10	534.0	440.10	Usar el M. B	2.08	2.39	1.64	19.12	13.00	32.02	
2.2	6.39	3.50	3.63	2.49	2.58	1.46	987.04	1046.00	581.0	465.00	Usar el M. B	2.12	2.37	2.17	17.72	10.41	41.24	
2.3	6.11	4.00	4.17	2.49	2.58	1.46	1060.28	1117.90	628.0	489.90	Usar el M. B	2.16	2.35	2.71	16.54	8.02	51.48	
2.4	6.13	4.50	4.71	2.49	2.58	1.46	1075.46	1138.55	638.5	500.05	Usar el M. B	2.15	2.34	3.26	17.49	7.98	54.40	
2.5	6.53	5.00	5.26	2.49	2.58	1.46	1090.49	1159.20	649.0	510.20	Usar el M. B	2.14	2.32	3.81	18.43	7.92	57.01	
3.1	6.33	4.50	4.71	2.55	2.68	1.93	1066.32	1159.10	665.5	493.60	Usar el M. B	2.16	2.39	2.78	19.09	9.54	50.06	
3.2	6.70	5.00	5.26	2.55	2.68	1.93	1116.91	1176.15	676.8	499.40	Usar el M. B	2.24	2.37	3.33	16.68	5.68	65.92	
3.3	6.74	5.50	5.82	2.55	2.68	1.93	1132.30	1193.20	688.0	505.20	Usar el M. B	2.24	2.35	3.89	16.94	4.82	71.55	
3.4	6.43	6.00	6.38	2.55	2.68	1.93	1186.30	1225.70	696.3	529.45	Usar el M. B	2.24	2.34	4.45	17.40	4.19	75.95	
3.5	7.03	6.50	6.95	2.55	2.68	1.93	1240.30	1258.20	704.5	553.70	Usar el M. B	2.24	2.32	5.02	17.87	3.55	80.13	

N° de probeta	Altura de probeta		% de asfalto		Densidad agregados			Peso probeta			Densidad probeta		Contenido de asfalto Útil (Pbu)	% de vacíos			
	cm	Base mezcla	Base agregados (Pb)	Densidad real seca de áridos (PRS)	Densidad efectiva del árido (PE)	% Asfalto absorbido (Pab)	Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua	Volumen	Aab < 2	Densidad real		Densidad máxima teórica (Dmm)	(V.A.M.)	% de huecos de aire (Va)	% de huecos llenos de Asfalto (VLL)
		%										%		grs/cm ³			
4.1	6.42	5.50	5.82	2.50	2.57	1.15	1137.15	1169.55	663.3	506.30	Usar el M. B	2.25	2.32	4.67	15.15	3.00	80.20
4.2	6.53	6.00	6.38	2.50	2.57	1.15	1145.53	1170.38	665.6	504.75	Usar el M. B	2.27	2.30	5.23	14.71	1.32	91.01
4.3	6.41	6.50	6.95	2.50	2.57	1.15	1146.50	1171.20	668.0	503.20	Usar el M. B	2.28	2.28	5.80	14.83	0.27	98.18
4.4	6.26	7.00	7.53	2.50	2.57	1.15	1157.65	1183.25	669.3	514.00	Usar el M. B	2.25	2.27	6.37	16.26	0.76	95.34
4.5	6.75	7.50	8.11	2.50	2.57	1.15	1166.30	1194.80	670.5	524.30	Usar el M. B	2.22	2.25	6.96	17.74	1.33	92.49
5.1	6	4.00	4.17	2.49	2.58	1.35	1110.44	1168.10	661.5	506.60	Usar el M. B	2.19	2.36	2.81	15.60	6.98	55.25
5.2	6.47	4.50	4.71	2.49	2.58	1.35	1120.25	1173.25	666.8	506.50	Usar el M. B	2.21	2.34	3.36	15.29	5.50	64.02
5.3	6.54	5.00	5.26	2.49	2.58	1.35	1122.69	1178.40	672.0	506.40	Usar el M. B	2.22	2.32	3.91	15.53	4.63	70.19
5.4	6.21	5.50	5.82	2.49	2.58	1.35	1124.39	1189.40	670.3	519.15	Usar el M. B	2.17	2.31	4.47	17.91	6.20	65.39
5.5	6.86	6.00	6.38	2.49	2.58	1.35	1125.93	1200.40	668.5	531.90	Usar el M. B	2.12	2.29	5.03	20.19	7.71	61.84
6.1	7.08	3.50	3.63	2.53	2.60	1.13	1215.22	1180.80	640.5	540.30	Usar el M. B	2.25	2.41	2.50	14.23	6.49	54.39
6.2	7.11	4.00	4.17	2.53	2.60	1.13	1243.95	1176.30	629.5	546.80	Usar el M. B	2.27	2.39	3.04	13.70	4.75	65.33
6.3	7.14	4.50	4.71	2.53	2.60	1.13	1261.57	1171.80	618.5	553.30	Usar el M. B	2.28	2.37	3.58	13.95	3.86	72.31
6.4	6.83	5.00	5.26	2.53	2.60	1.13	1263.64	1179.40	622.3	557.15	Usar el M. B	2.27	2.36	4.13	14.85	3.70	75.06
6.5	7.12	5.50	5.82	2.53	2.60	1.13	1268.29	1187.00	626.0	561.00	Usar el M. B	2.26	2.34	4.69	15.57	3.35	78.50

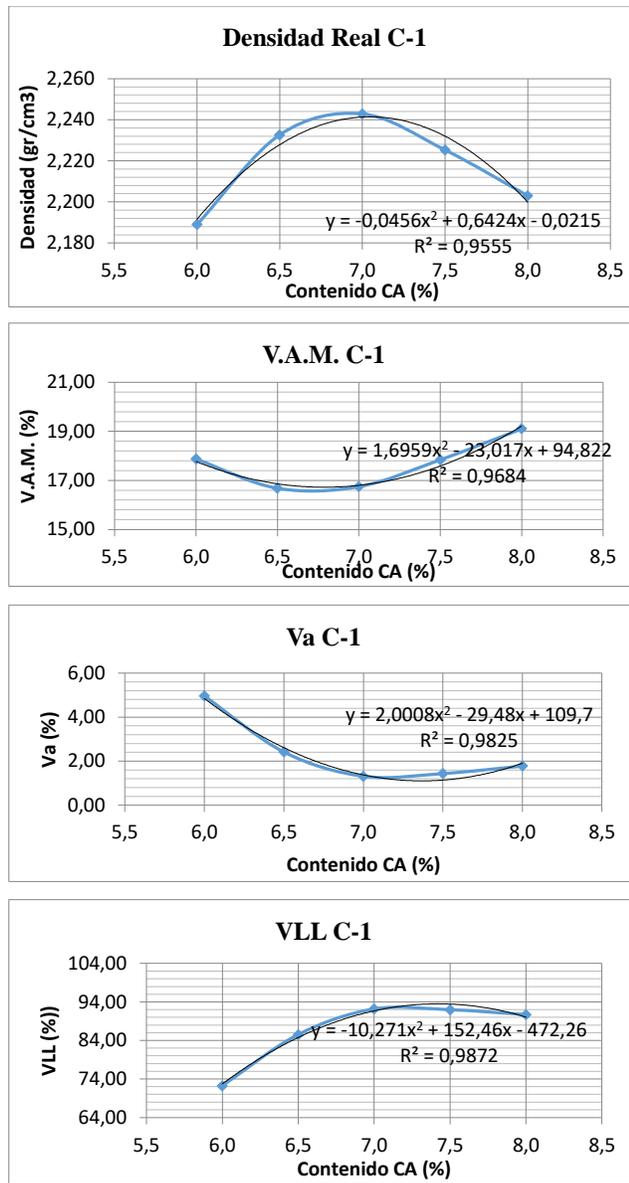
N° de probeta	Altura de probeta		% de asfalto		Densidad agregados			Peso probeta			Densidad probeta		Contenido de asfalto Útil (Pbu)	% de vacíos			
	Base mezcla	Base agregados (Pb)	Densidad real seca de áridos (PRS)	Densidad efectiva del árido (PE)	% Asfalto absorbido (Pab)	Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua	Volumen	Aab < 2	Densidad real	Densidad máxima teórica (Dmm)		(V.A.M.)	% de huecos de aire (Va)	% de huecos llenos de Asfalto (VLL)	
	cm	%	%	g/cm ³	g/cm ³	%	grs.	grs.	grs.	cm ³		grs/cm ³		grs/cm ³	%	%	%
7.1	5.87	6.00	6.38	2.47	2.55	1.29	993.78	1076.20	619.0	457.20	Usar el M. B	2.17	2.27	5.10	17.17	4.35	74.69
7.2	6.21	6.50	6.95	2.47	2.55	1.29	1036.10	1119.35	653.0	466.35	Usar el M. B	2.22	2.26	5.67	15.79	1.59	89.95
7.3	6.22	7.00	7.53	2.47	2.55	1.29	1043.60	1162.50	687.0	475.50	Usar el M. B	2.19	2.24	6.24	17.25	2.15	87.55
7.4	5.96	7.50	8.11	2.47	2.55	1.29	1021.34	1177.10	684.8	492.35	Usar el M. B	2.07	2.23	6.82	22.21	6.91	68.88
7.5	6.55	8.00	8.70	2.47	2.55	1.29	1024.75	1191.70	682.5	509.20	Usar el M. B	2.01	2.21	7.41	24.94	9.11	63.47
8.1	6.53	6.00	6.38	2.48	2.56	1.21	1171.78	1135.50	621.0	514.50	Usar el M. B	2.28	2.42	5.17	13.85	6.05	56.32
8.2	6.90	6.50	6.95	2.48	2.56	1.21	1200.83	1160.95	646.3	514.70	Usar el M. B	2.33	2.41	5.74	12.21	3.12	74.49
8.3	7.13	7.00	7.53	2.48	2.56	1.21	1195.88	1186.40	671.5	514.90	Usar el M. B	2.32	2.39	6.31	13.08	2.92	77.69
8.4	6.62	7.50	8.11	2.48	2.56	1.21	1194.63	1165.40	646.3	519.15	Usar el M. B	2.30	2.38	6.90	14.34	3.18	77.81
8.5	7.04	8.00	8.70	2.48	2.56	1.21	1190.43	1144.40	621.0	523.40	Usar el M. B	2.27	2.36	7.48	15.79	3.68	76.69
9.1	6.71	3.00	3.09	2.51	2.59	1.29	1163.80	1199.20	671.5	527.70	Usar el M. B	2.21	2.40	1.80	14.76	8.26	44.06
9.2	6.81	3.50	3.63	2.51	2.59	1.29	1179.55	1187.75	661.7	526.05	Usar el M. B	2.24	2.39	2.33	13.79	6.07	55.98
9.3	6.73	4.00	4.17	2.51	2.59	1.29	1195.99	1176.30	651.9	524.40	Usar el M. B	2.28	2.37	2.87	12.76	3.79	70.28
9.4	6.53	4.50	4.71	2.51	2.59	1.29	1147.45	1176.00	669.7	506.30	Usar el M. B	2.27	2.35	3.42	13.76	3.74	72.86
9.5	6.98	5.00	5.26	2.51	2.59	1.29	1096.55	1175.70	687.5	488.20	Usar el M. B	2.25	2.34	3.97	14.98	3.94	73.71

N° de probeta	Altura de probeta	% de asfalto		Densidad agregados			Peso probeta			Volumen	Aab < 2	Densidad probeta		Contenido de asfalto Útil (Pbu)	% de vacíos		
		Base mezcla	Base agregados (Pb)	Densidad real seca de áridos (PPS)	Densidad efectiva del árido (PE)	% Asfalto absorbido (Pab)	Seco	Sat. sup. seca	Sumergida en agua			Densidad real	Densidad máxima teórica (Dmm)		(V.A.M.)	% de huecos de aire (Va)	% de huecos llenos de Asfalto (VLL)
	cm	%	%	g/cm ³	g/cm ³	%	grs.	grs.	grs.	cm ³		grs/cm ³	grs/cm ³	%	%	%	%
10.1	7.06	8.00	8.70	2.51	2.57	0.85	1269.39	1195.30	651.0	544.30	Usar el M. B	2.33	2.45	7.85	14.63	4.85	66.85
10.2	6.84	8.50	9.29	2.51	2.57	0.85	1371.79	1255.60	675.3	580.30	Usar el M. B	2.36	2.44	8.44	13.94	2.92	79.05
10.3	6.91	9.00	9.89	2.51	2.57	0.85	1344.49	1219.50	629.0	568.60	Usar el M. B	2.36	2.42	9.04	14.39	2.26	84.30
10.4	6.56	9.50	10.5	2.51	2.57	0.85	1285.47	1150.10	598.8	545.60	Usar el M. B	2.36	2.40	9.65	15.16	1.98	86.96
10.5	6.54	10.00	11.1	2.51	2.57	0.85	1194.37	1080.70	568.5	512.20	Usar el M. B	2.33	2.39	10.26	16.50	2.36	85.70
11.1	7.12	3.00	3.09	2.49	2.59	1.52	1088.28	1200.80	695.5	505.30	Usar el M. B	2.15	2.39	1.58	16.10	9.75	39.46
11.2	7.08	3.50	3.63	2.49	2.59	1.52	1129.22	1211.30	695.0	516.30	Usar el M. B	2.19	2.37	2.11	15.24	7.71	49.40
11.3	7.14	4.00	4.17	2.49	2.59	1.52	1167.37	1221.80	694.5	527.30	Usar el M. B	2.21	2.35	2.65	14.65	5.94	59.45
11.4	6.80	4.50	4.71	2.49	2.59	1.52	1153.24	1228.80	698.5	530.32	Usar el M. B	2.17	2.34	3.19	16.60	6.97	57.98
11.5	6.98	5.00	5.26	2.49	2.59	1.52	1148.05	1235.80	702.5	533.34	Usar el M. B	2.15	2.32	3.75	17.87	7.29	59.21

Fuente: Elaboración propia

3.4.13.1. Curva 1

Gráfico 3.16 Densidad real, VAM, VA, VLL C-1



Fuente: Elaboración propia

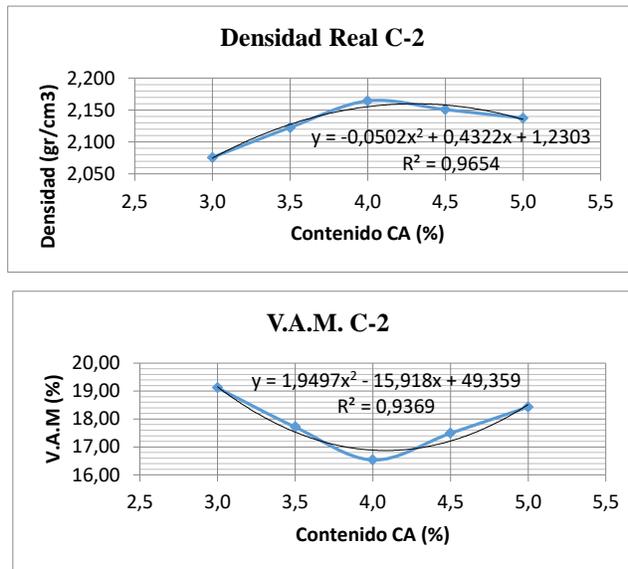
Tabla 3.46 Contenido de CA para la máxima densidad y 5% de Va C-1

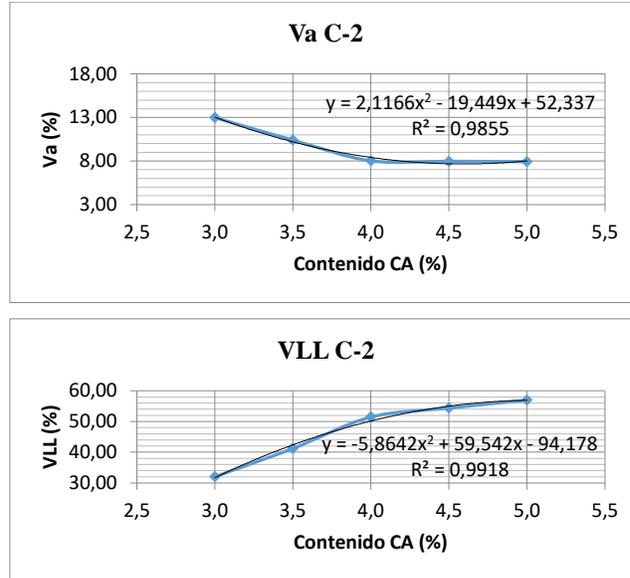
Ecuación CA vs Densidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la max densidad	Densidad máxima gr/cm ³	Ecuación CA vs VA $y = ax^2 + bx + c$				% CA para 5% de Va Máx
R	a	b	c			R	a	b	c	
0.96	-0.046	0.642	-0.022	7.04	2.24	0.98	2.001	-29.480	109.700	5.97

Fuente: Elaboración propia

3.4.13.2. Curva 2

Gráfico 3.17 Densidad real, VAM, VA, VLL C-2





Fuente: Elaboración propia

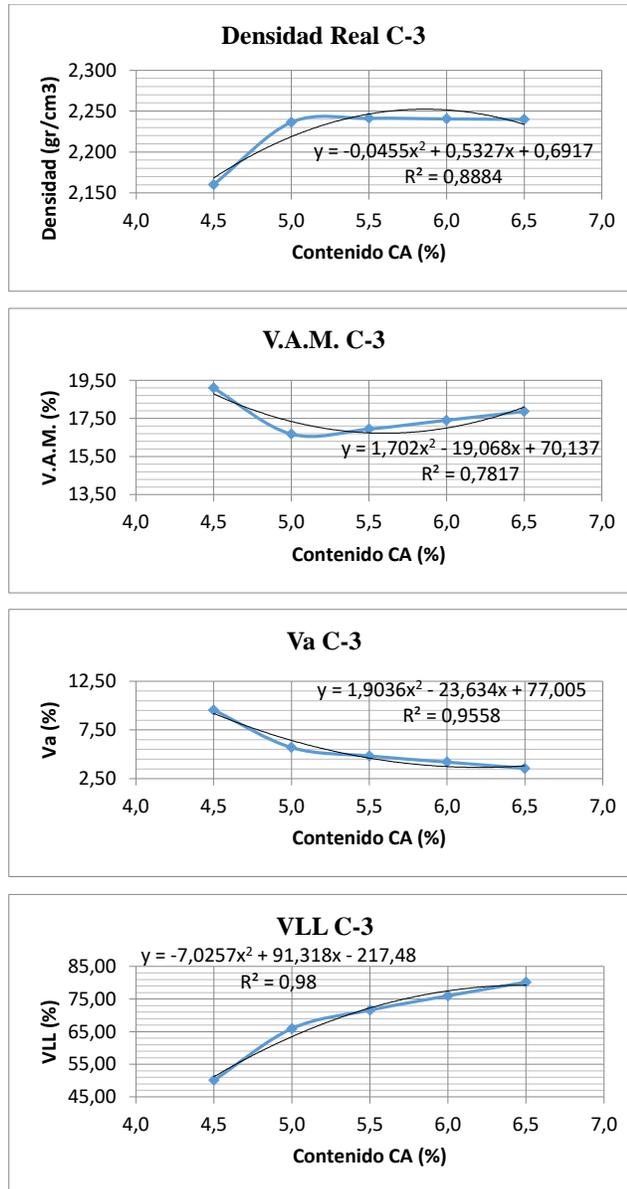
Tabla 3.47 Contenido de CA para la máxima densidad y 5% de Va C-2

Ecuación CA vs Densidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la max densidad	Densidad máxima gr/cm ³	Ecuación CA vs VA $y = ax^2 + bx + c$				% CA para 5% de Va Máx
R	a	b	c			R	a	b	c	
0.97	-0.050	0.432	1.230	4.30	2.16	0.98	2.063	-19.056	51.636	4.63

Fuente: Elaboración propia

3.4.13.3. Curva 3

Gráfico 3.18 Densidad real, VAM, VA, VLL C-3



Fuente: Elaboración propia

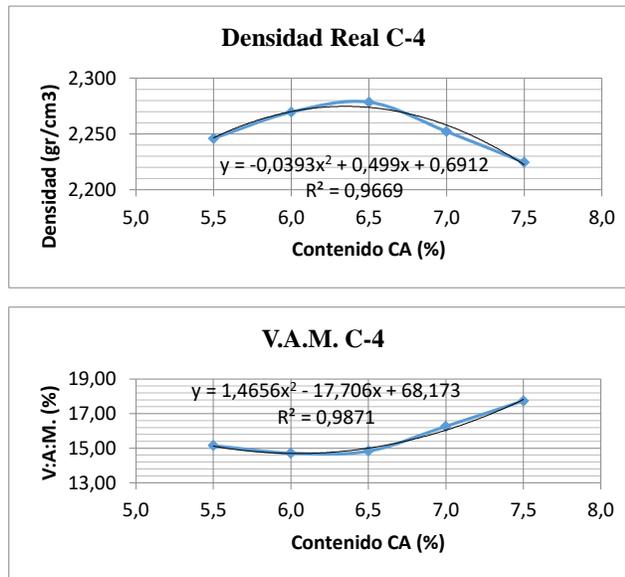
Tabla 3.48 Contenido de CA para la máxima densidad y 5% de Va C-3

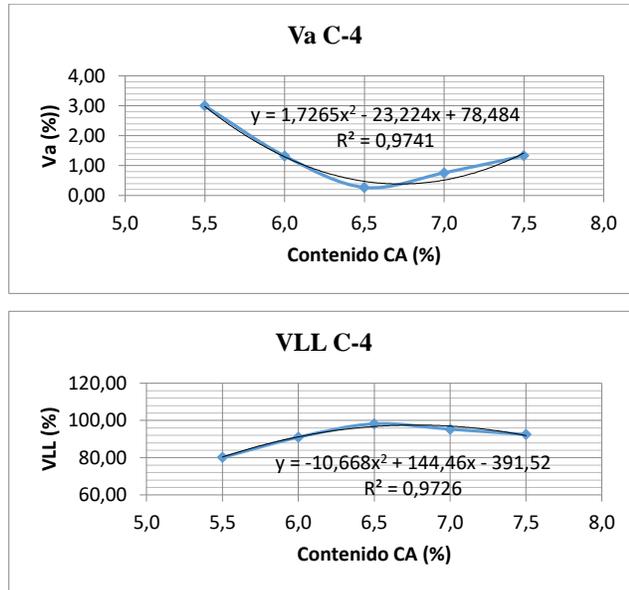
Ecuación CA vs Densidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la max densidad	Densidad máxima gr/cm ³	Ecuación CA vs VA $y = ax^2 + bx + c$				% CA para 5% de Va Máx
R	a	b	c			R	a	b	c	
0.89	-0.046	0.533	0.692	5.85	2.25	0.96	1.904	-23.634	77.005	5.36

Fuente: Elaboración propia

3.4.13.4. Curva 4

Gráfico 3.19 Densidad real, VAM, VA, VLL C-1





Fuente: Elaboración propia

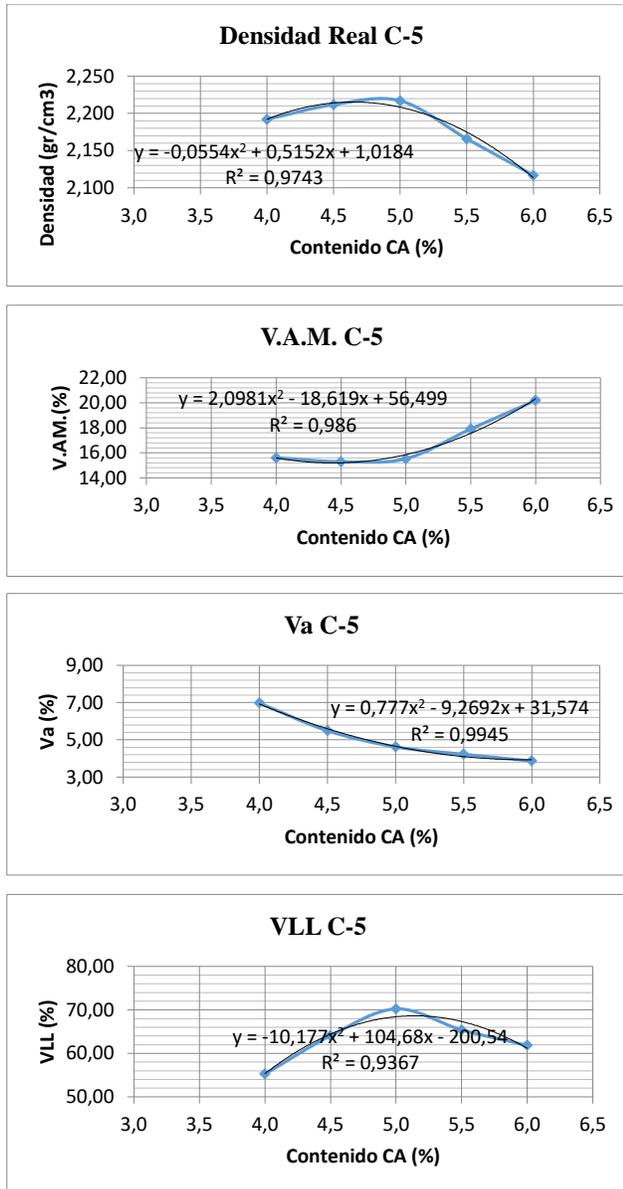
Tabla 3.49 Contenido de CA para la máxima densidad y 5% de Va C-4

Ecuación CA vs Densidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la max densidad	Densidad máxima gr/cm ³	Ecuación CA vs VA $y = ax^2 + bx + c$				% CA para 5% de Va Máx
R	a	b	c			R	a	b	c	
0.97	-0.039	0.499	0.691	6.35	2.28	0.97	1.727	-23.224	78.484	5.09

Fuente: Elaboración propia

3.4.13.5. Curva 5

Gráfico 3.20 Densidad real, VAM, VA, VLL C-5



Fuente: Elaboración propia

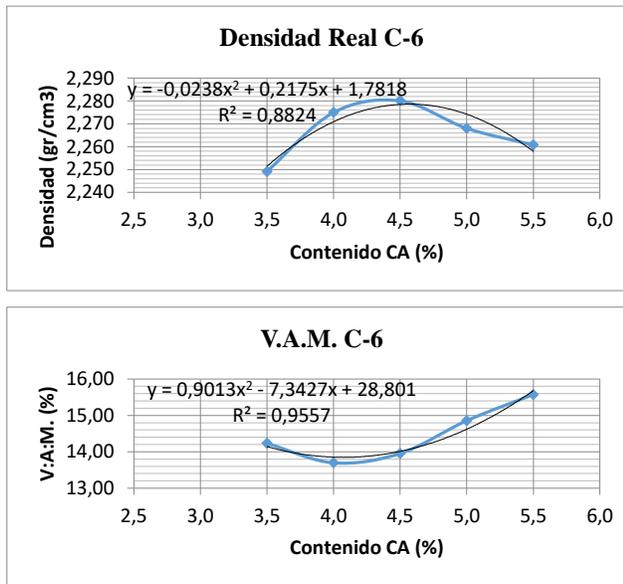
Tabla 3.50 Contenido de CA para la máxima densidad y 5% de Va C-5

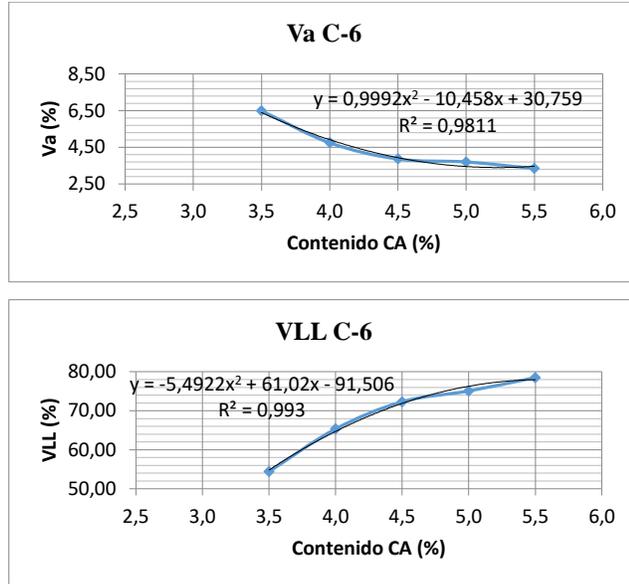
Ecuación CA vs Densidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la max densidad	Densidad máxima gr/cm ³	Ecuación CA vs VA $y = ax^2 + bx + c$				% CA para 5% de Va Máx
R	a	b	c			R	a	b	c	
0.97	-0.055	0.515	1.018	4.65	2.22	0.99	0.777	-9.269	31.574	4.79

Fuente: Elaboración propia

3.4.13.6. Curva 6

Gráfico 3.21 Densidad real, VAM, VA, VLL C-6





Fuente: Elaboración propia

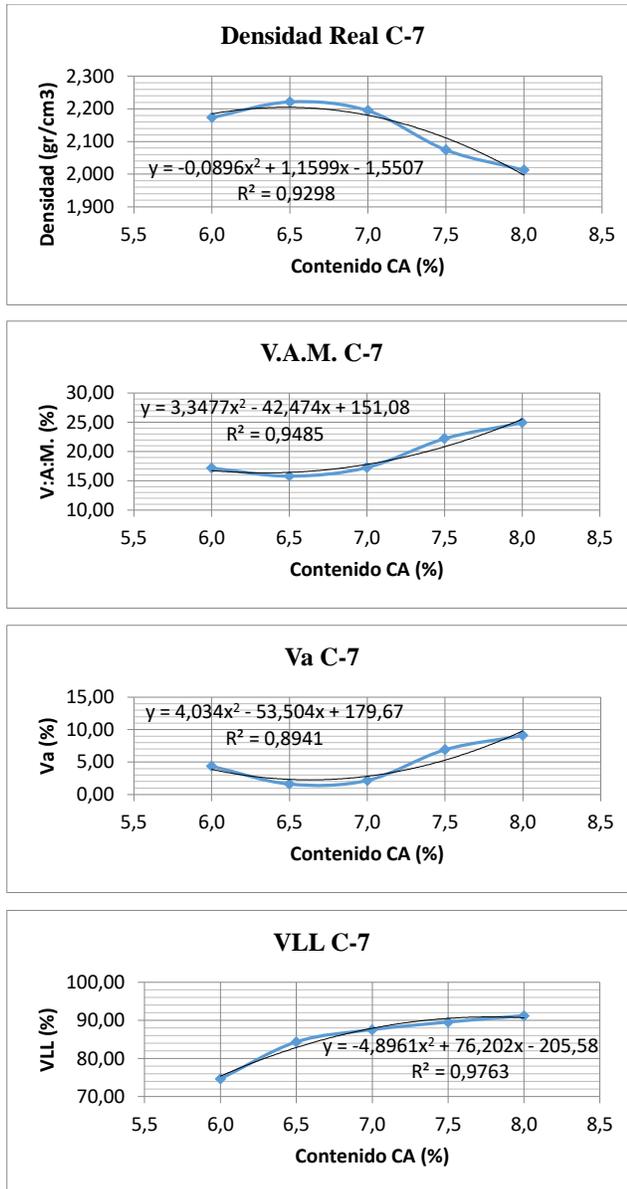
Tabla 3.51 Contenido de CA para la máxima densidad y 5% de Va C-6

Ecuación CA vs Densidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la max densidad	Densidad máxima gr/cm3	Ecuación CA vs VA $y = ax^2 + bx + c$				% CA para 5% de Va Máx
R	a	b	c			R	a	b	c	
0.88	-0.024	0.218	1.782	4.57	2.28	0.98	0.999	-10.458	30.759	3.97

Fuente: Elaboración propia

3.4.13.7. Curva 7

Gráfico 3.22 Densidad real, VAM, VA, VLL C-7



Fuente: Elaboración propia

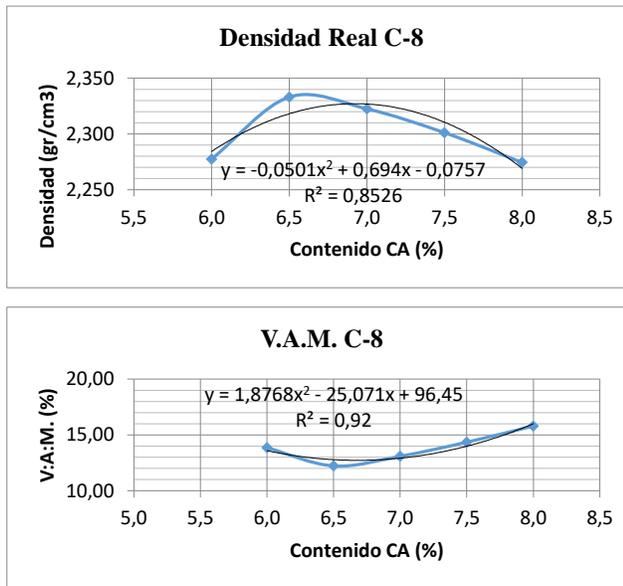
Tabla 3.52 Contenido de CA para la máxima densidad y 5% de Va C-7

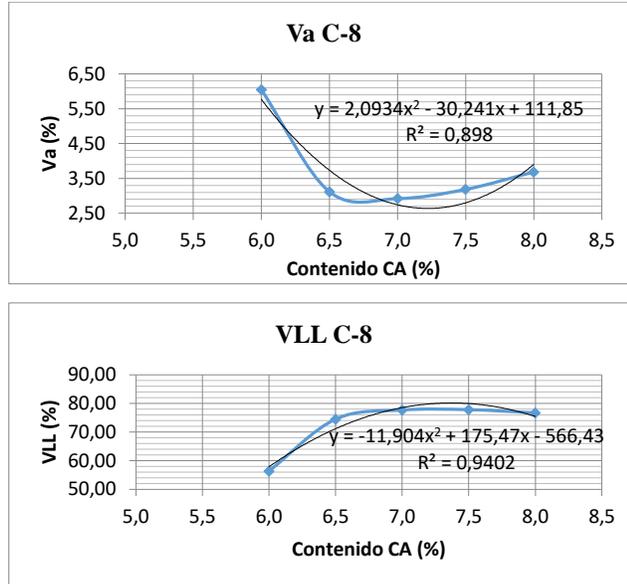
Ecuación CA vs Densidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la max densidad	Densidad máxima	Ecuación CA vs VA $y = ax^2 + bx + c$				% CA para 5% de Va
R	a	b	c		gr/cm ³	R	a	b	c	Máx
0.93	-0.090	1.160	-1.551	6.47	2.20	0.99	0.362	-6.727	31.737	5.76

Fuente: Elaboración propia

3.4.13.8. Curva 8

Gráfico 3.23 Densidad real, VAM, VA, VLL C-8





Fuente: Elaboración propia

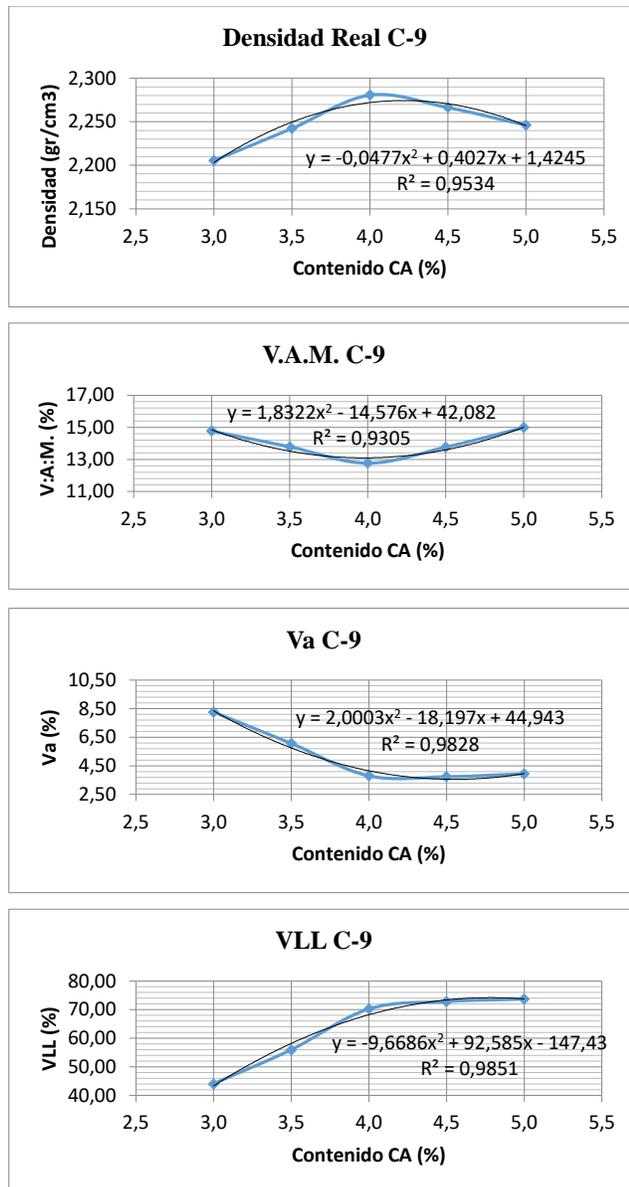
Tabla 3.53 Contenido de CA para la máxima densidad y 5% de Va C-8

Ecuación CA vs Densidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la max densidad	Densidad máxima gr/cm3	Ecuación CA vs VA $y = ax^2 + bx + c$				% CA para 5% de Va Máx
R	a	b	c			R	a	b	c	
0.85	-0.050	0.694	-0.076	6.93	2.33	0.90	2.093	-30.241	111.850	6.16

Fuente: Elaboración propia

3.4.13.9. Curva 9

Gráfico 3.24 Densidad real, VAM, VA, VLL C-9



Fuente: Elaboración propia

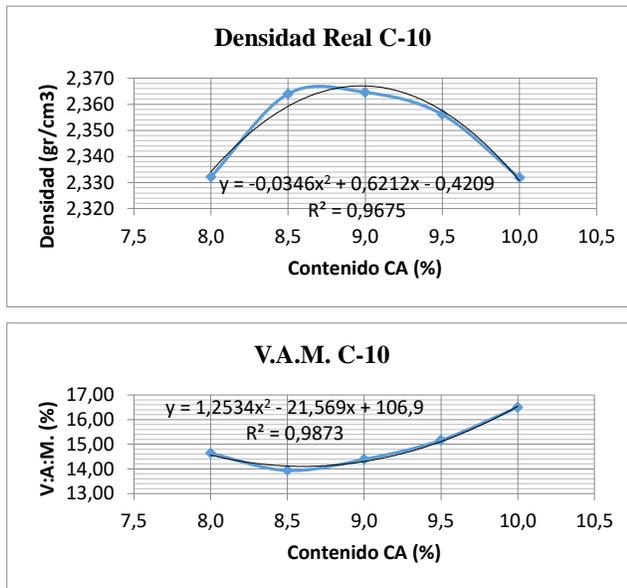
Tabla 3.54 Contenido de CA para la máxima densidad y 5% de Va C-9

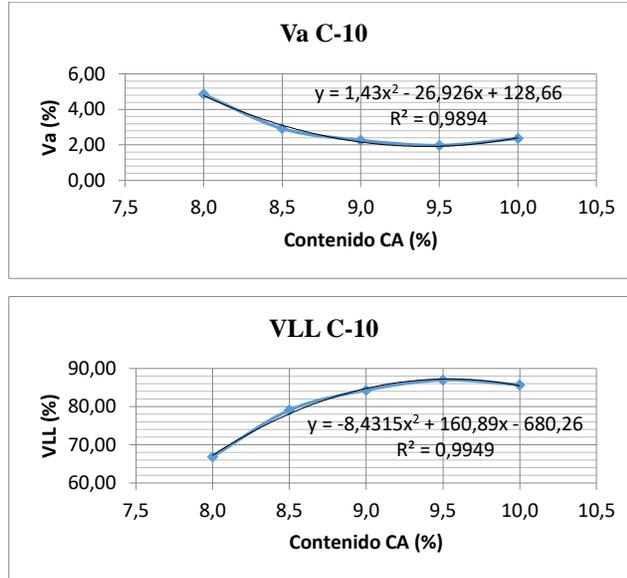
Ecuación CA vs Densidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la max densidad	Densidad máxima gr/cm ³	Ecuación CA vs VA $y = ax^2 + bx + c$				% CA para 5% de Va Máx
R	a	b	c			R	a	b	c	
0.95	-0.048	0.403	1.425	4.22	2.27	0.98	2.000	-18.197	44.943	3.70

Fuente: Elaboración propia

3.4.13.10. Curva 10

Gráfico 3.25 Densidad real, VAM, VA, VLL C-10





Fuente: Elaboración propia

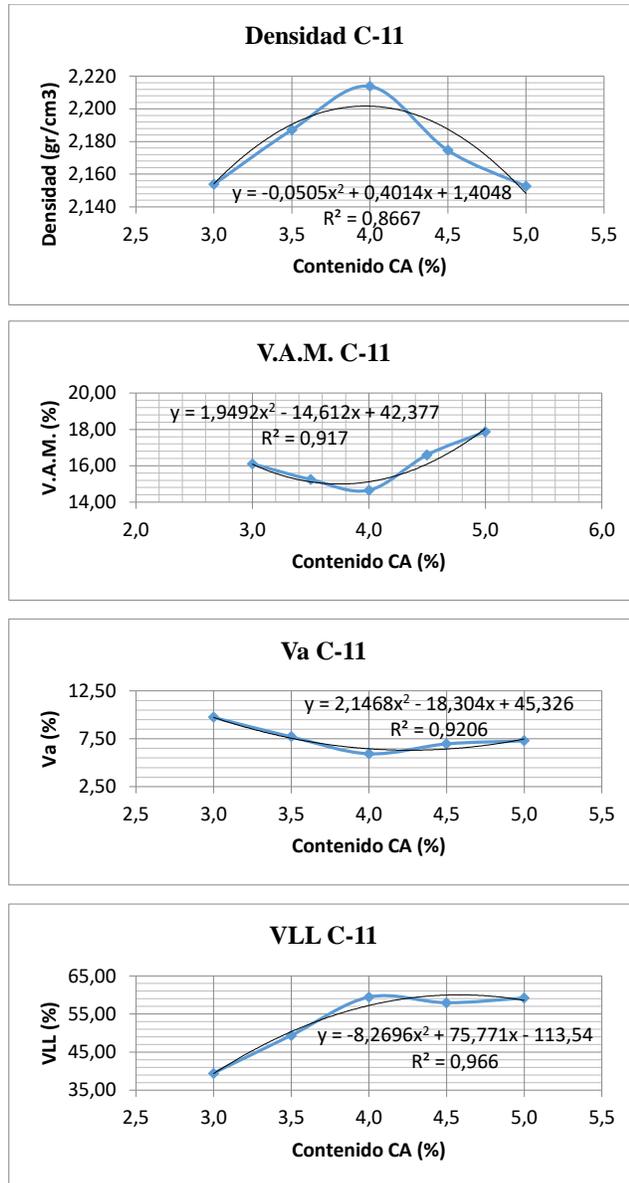
Tabla 3.55 Contenido de CA para la máxima densidad y 5% de Va C-10

Ecuación CA vs Densidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la max densidad	Densidad máxima gr/cm ³	Ecuación CA vs VA $y = ax^2 + bx + c$				% CA para 5% de Va Máx
R	a	b	c			R	a	b	c	
0.97	-0.035	0.621	0.421	8.98	3.21	0.99	1.430	-26.926	128.660	7.94

Fuente: Elaboración propia

3.4.13.11. Curva 11

Gráfico 3.26 Densidad real, VAM, VA, VLL C-11



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.56 Contenido de CA para la máxima densidad y 5% de Va C-11

Ecuación CA vs Densidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la max densidad	Densidad máxima gr/cm ³	Ecuación CA vs VA $y = ax^2 + bx + c$				% CA para 5% de Va Máx
R	a	b	c			R	a	b	c	
0.87	-0.051	0.401	1.405	3.97	2.20	0.95	3.024	-25.478	59.115	4.36

Fuente: Elaboración propia

3.4.13.12. Análisis de Resultados

En todas las curvas granulométricas de contenido de cemento asfáltico vs densidad real se puede apreciar un comportamiento similar, representada por una curva polinómica de segundo grado (pues tiene valores de correlación de Pearson mayores a 0.85), es decir a medida que crece el contenido asfáltico aumenta la densidad, hasta que llega un punto máximo donde al seguir agregando asfalto deja de incrementarse la densidad y empieza a decaer su valor.

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM), al contrario de la curva de densidad generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta a medida que el contenido de asfalto se acrecienta, también está representado por una curva polinómica de segundo grado (valores de correlación de Pearson mayores a 0.85).

El porcentaje de vacíos (Va) de todas las curvas también tienen un comportamiento similar entre sí, su valor decrece a medida que aumenta el contenido de cemento asfáltico. En todos los casos la curva de tendencia que mejor representó es una polinómica de segundo grado, pues el valor mínimo es 0.9.

El porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VLL), también se comporta de forma similar en todos los casos, una curva polinómica de segundo grado fue la que mejor simuló este comportamiento que crece con aumentos de contenido de asfalto.

3.4.14. Determinación de la Estabilidad y Fluencia de Marshall

Cada probeta fue compactada a una temperatura entre 135° C y 145° C.

Datos iniciales para estabilidad y fluencia de Marshall

Tabla 3.57 Datos para la estabilidad y fluencia Marsahl

Marshall 1				Marshall 2				Marshall 3			
N° prob.	Alt prob cm	Estab.	Fluencia	N° prob.	Alt prob cm	Estab.	Fluencia	N° prob.	Alt prob cm	Estab.	Fluencia
		Lect. del dial mm	Lectura del dial 0,01 pulg			Lect. del dial Mm	Lectura del dial 0,01 pulg			dial mm	Lectura del dial 0,01 pulg
1.1.1	6.50	692.58	16.2	1.2.1	6.70	714.45	16.66	1.3.1	7.32	780.06	18.19
1.1.2	6.25	695.02	16.4	1.2.2	6.45	716.97	16.95	1.3.2	7.04	782.81	18.51
1.1.3	5.96	542.87	16.9	1.2.3	6.14	560.01	17.44	1.3.3	6.71	611.44	19.05
1.1.4	6.00	462.85	18.1	1.2.4	6.19	477.46	18.62	1.3.4	6.76	521.31	20.33
1.1.5	6.31	419.44	18.3	1.2.5	6.51	432.69	18.91	1.3.5	7.10	472.43	20.65
2.1.1	6.20	443.31	5.7	2.2.1	6.40	457.31	5.88	2.3.1	6.99	499.31	6.42
2.1.2	6.07	465.15	7.1	2.2.2	6.26	479.84	7.35	2.3.2	6.84	523.91	8.03
2.1.3	5.80	468.64	7.7	2.2.3	5.99	483.44	7.94	2.3.3	6.54	527.84	8.67
2.1.4	5.83	359.70	8.6	2.2.4	6.01	371.06	8.82	2.3.4	6.56	405.13	9.63
2.1.5	6.20	304.59	10.5	2.2.5	6.40	314.21	10.78	2.3.5	6.99	343.06	11.77
3.1.1	6.01	596.94	14.3	3.2.1	6.20	615.79	14.70	3.3.1	6.77	672.34	16.05
3.1.2	6.37	681.91	14.6	3.2.2	6.57	703.45	15.09	3.3.2	7.17	768.05	16.48
3.1.3	6.40	723.46	15.2	3.2.3	6.61	746.30	15.68	3.3.3	7.21	814.84	17.12
3.1.4	6.11	533.87	15.7	3.2.4	6.30	550.72	16.17	3.3.4	6.88	601.30	17.66
3.1.5	6.68	485.42	16.2	3.2.5	6.89	500.75	16.66	3.3.5	7.52	546.74	18.19

Marshall 1			
N° prob.	Alt prob	Estab.	Fluencia
		dial	Lectura del dial
	cm	mm	0,01 pulg
4.1.1	6.10	566.36	15.20
4.1.2	6.20	638.04	15.68
4.1.3	6.08	680.51	16.06
4.1.4	5.95	552.48	16.25
4.1.5	6.41	522.57	17.10
5.1.1	5.70	481.33	7.60
5.1.2	6.14	588.14	9.50
5.1.3	6.21	646.60	11.88
5.1.4	5.90	495.44	13.30
5.1.5	6.52	482.35	14.82
6.1.1	6.73	739.77	12.35
6.1.2	6.76	818.40	12.83
6.1.3	6.78	905.61	14.25
6.1.4	6.49	720.92	14.54
6.1.5	6.76	653.21	15.20
7.1.1	5.58	495.39	15.20
7.1.2	5.90	583.10	15.39
7.1.3	5.91	624.66	15.96
7.1.4	5.67	494.22	16.15
7.1.5	6.22	491.79	17.10
8.1.1	6.20	685.98	13.30
8.1.2	6.56	858.67	14.25

Marshall 2			
N° prob.	Alt prob	Estab.	Fluencia
		dial	Lectura del dial
	cm	mm	0,01 pulg
4.2.1	6.29	584.24	15.68
4.2.2	6.39	658.19	16.17
4.2.3	6.28	702.00	16.56
4.2.4	6.14	569.92	16.76
4.2.5	6.62	539.07	17.64
5.2.1	5.88	496.53	7.84
5.2.2	6.34	606.72	9.80
5.2.3	6.41	667.01	12.25
5.2.4	6.08	511.09	13.72
5.2.5	6.72	497.58	15.29
6.2.1	6.94	763.13	12.74
6.2.2	6.97	844.24	13.23
6.2.3	7.00	934.21	14.70
6.2.4	6.69	743.69	14.99
6.2.5	6.98	673.84	15.68
7.2.1	5.75	511.04	15.68
7.2.2	6.09	601.51	15.88
7.2.3	6.10	644.39	16.46
7.2.4	5.85	509.83	16.66
7.2.5	6.42	507.32	17.64
8.2.1	6.40	707.64	13.72
8.2.2	6.76	885.79	14.70

Marshall 3			
N° prob.	Alt prob	Estab.	Fluencia
		dial	Lectura del dial
	cm	mm	0,01 pulg
4.3.1	6.87	637.90	17.12
4.3.2	6.98	718.63	17.66
4.3.3	6.85	766.47	18.08
4.3.4	6.70	622.26	18.30
4.3.5	7.22	588.58	19.26
5.3.1	6.42	542.13	8.56
5.3.2	6.92	662.44	10.70
5.3.3	7.00	728.27	13.38
5.3.4	6.64	558.03	14.98
5.3.5	7.34	543.27	16.69
6.3.1	7.58	833.21	13.91
6.3.2	7.61	921.78	14.45
6.3.3	7.64	1020.00	16.05
6.3.4	7.31	811.99	16.37
6.3.5	7.62	735.72	17.12
7.3.1	6.28	557.97	17.12
7.3.2	6.65	656.75	17.33
7.3.3	6.66	703.56	17.98
7.3.4	6.38	556.65	18.19
7.3.5	7.01	553.91	19.26
8.3.1	6.99	772.63	14.98
8.3.2	7.38	967.14	16.05

Marshall 1				Marshall 2				Marshall 3			
N° prob.	Alt prob	Estab.	Fluencia	N° prob.	Alt prob	Estab.	Fluencia	N° prob.	Alt prob	Estab.	Fluencia
		dial	Lectura del dial			dial	Lectura del dial			dial	Lectura del dial
	cm	mm	0,01 pulg		cm	mm	0,01 pulg		cm	mm	0,01 pulg
8.1.3	6.77	755.92	16.15	8.2.3	6.99	779.80	16.66	8.3.3	7.63	851.41	18.19
8.1.4	6.29	620.12	16.63	8.2.4	6.49	639.71	17.15	8.3.4	7.09	698.45	18.73
8.1.5	6.69	507.50	17.01	8.2.5	6.90	523.52	17.54	8.3.5	7.53	571.60	19.15
9.1.1	6.37	715.30	11.88	9.2.1	6.58	737.89	12.25	9.3.1	7.18	805.65	13.38
9.1.2	6.47	807.97	12.35	9.2.2	6.67	833.48	12.74	9.3.2	7.28	910.02	13.91
9.1.3	6.39	868.85	12.73	9.2.3	6.60	896.28	13.13	9.3.3	7.20	978.60	14.34
9.1.4	6.21	707.83	14.25	9.2.4	6.40	730.18	14.70	9.3.4	6.99	797.24	16.05
9.1.5	6.63	646.67	15.01	9.2.5	6.84	667.09	15.48	9.3.5	7.47	728.36	16.91
10.1.1	6.71	821.63	14.25	10.2.1	6.92	847.57	14.70	10.3.1	7.55	925.41	16.05
10.1.2	6.49	893.51	15.49	10.2.2	6.70	921.73	15.97	10.3.2	7.32	1006.38	17.44
10.1.3	6.56	855.15	15.87	10.2.3	6.77	882.15	16.37	10.3.3	7.39	963.16	17.87
10.1.4	6.24	719.35	16.06	10.2.4	6.43	742.06	16.56	10.3.4	7.02	810.21	18.08
10.1.5	6.21	606.74	16.44	10.2.5	6.41	625.90	16.95	10.3.5	7.00	683.38	18.51
11.1.1	6.76	480.84	5.70	11.2.1	6.98	496.02	5.88	11.3.1	7.62	541.57	6.42
11.1.2	6.73	504.89	7.13	11.2.2	6.94	520.83	7.35	11.3.2	7.58	568.66	8.03
11.1.3	6.78	445.87	9.31	11.2.3	7.00	459.95	9.60	11.3.3	7.64	502.19	10.49
11.1.4	6.46	359.86	9.98	11.2.4	6.66	371.22	10.29	11.3.4	7.27	405.31	11.24
11.1.5	6.63	327.47	11.88	11.2.5	6.84	337.81	12.25	11.3.5	7.47	368.83	13.38

Fuente: Elaboración propia

Utilizando los promedios aritméticos de los datos anteriores se obtuvo:

Tabla 3.58 Estabilidad y fluencia Marshall

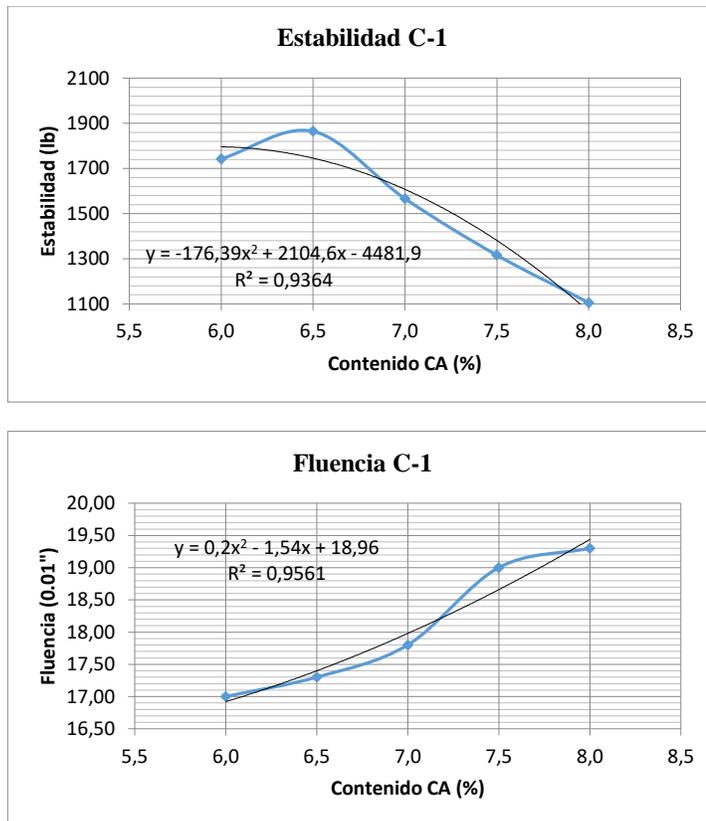
N° de probeta	Estabilidad					Fluencia
	Altura de probeta	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad corregida	Fluencia promedio
	cm	mm	libras	-	libras	0,01 pulg
1.1	6.84	729.03	1962.59	0.888	1742.98	17.00
1.2	6.58	731.60	1969.57	0.947	1864.99	17.30
1.3	6.27	571.44	1534.37	1.021	1566.59	17.80
1.4	6.32	487.21	1305.49	1.008	1315.94	19.00
1.5	6.64	441.52	1181.35	0.936	1105.39	19.30
2.1	6.53	466.64	1249.61	0.956	1195.00	6.00
2.2	6.39	489.63	1312.09	0.990	1298.97	7.50
2.3	6.11	493.31	1322.07	1.068	1411.97	8.10
2.4	6.13	378.63	1010.45	1.062	1073.10	9.00
2.5	6.53	320.62	852.83	0.956	815.56	11.00
3.1	6.33	628.35	1689.02	1.005	1697.47	15.00
3.2	6.70	717.80	1932.08	0.923	1782.34	15.40
3.3	6.74	761.53	2050.92	0.913	1871.46	16.00
3.4	6.43	561.96	1508.63	0.980	1478.45	16.50
3.5	7.03	510.97	1370.06	0.853	1167.98	17.00
4.1	6.42	596.17	1601.57	0.983	1573.54	16.00
4.2	6.52	671.62	1806.59	0.958	1730.89	16.50
4.3	6.40	716.33	1928.08	0.988	1903.98	16.90
4.4	6.26	581.56	1561.86	1.024	1599.35	17.10
4.5	6.75	550.07	1476.32	0.910	1343.45	18.00
5.1	6.00	506.66	1358.35	1.103	1498.26	8.00
5.2	6.46	619.10	1663.88	0.973	1618.12	10.00
5.3	6.54	680.63	1831.07	0.954	1747.57	12.50
5.4	6.21	521.52	1398.73	1.037	1450.48	14.00
5.5	6.86	507.73	1361.26	0.884	1203.90	15.60
6.1	7.08	778.70	2097.57	0.843	1768.46	13.00
6.2	7.11	861.47	2322.48	0.838	1945.31	13.50
6.3	7.14	953.27	2571.92	0.832	2139.84	15.00
6.4	6.83	758.87	2043.66	0.890	1818.86	15.30
6.5	7.12	687.59	1849.98	0.836	1546.03	16.00

N° de probeta	Estabilidad					Fluencia
	Altura de probeta	Lectura del dial	Carga	Factor de corrección de altura de probeta	Estabilidad corregida	Fluencia promedio
	cm	mm	libras	-	libras	0,01 pulg
7.1	5.87	521.47	1398.58	1.143	1598.58	16.00
7.2	6.21	613.79	1649.45	1.037	1710.48	16.20
7.3	6.22	657.54	1768.32	1.035	1830.21	16.80
7.4	5.96	520.23	1395.23	1.115	1555.68	17.00
7.5	6.55	517.67	1388.27	0.953	1322.33	18.00
8.1	6.53	722.09	1943.72	0.956	1858.78	14.00
8.2	6.90	903.87	2437.67	0.877	2137.60	15.00
8.3	7.13	795.71	2143.78	0.834	1787.48	17.00
8.4	6.62	652.76	1755.35	0.939	1648.97	17.50
8.5	7.04	534.21	1433.21	0.851	1219.23	17.90
9.1	6.71	752.95	2027.58	0.920	1865.37	12.50
9.2	6.81	850.49	2292.63	0.895	2051.91	13.00
9.3	6.73	914.58	2466.77	0.915	2257.10	13.40
9.4	6.53	745.08	2006.20	0.956	1918.53	15.00
9.5	6.98	680.71	1831.28	0.862	1578.57	15.80
10.1	7.06	864.87	2331.71	0.847	1974.73	15.00
10.2	6.84	940.54	2537.32	0.888	2253.40	16.30
10.3	6.91	900.15	2427.58	0.875	2124.14	16.70
10.4	6.56	757.21	2039.15	0.951	1938.62	16.90
10.5	6.54	638.67	1717.05	0.954	1638.76	17.30
11.1	7.12	506.14	1356.95	0.836	1134.00	6.00
11.2	7.08	531.46	1425.74	0.843	1202.04	7.50
11.3	7.14	469.34	1256.94	0.832	1045.77	9.80
11.4	6.79	378.80	1010.92	0.900	909.82	10.50
11.5	6.98	344.70	918.27	0.862	791.55	12.50
ESPECIFICACIONES	Mínimo				1088.000	8
	Máximo				-	14

Fuente: Elaboración propia

3.4.14.1. Curva 1

Gráfico 3.27 Estabilidad, Fluencia C-1



Fuente: Elaboración propia

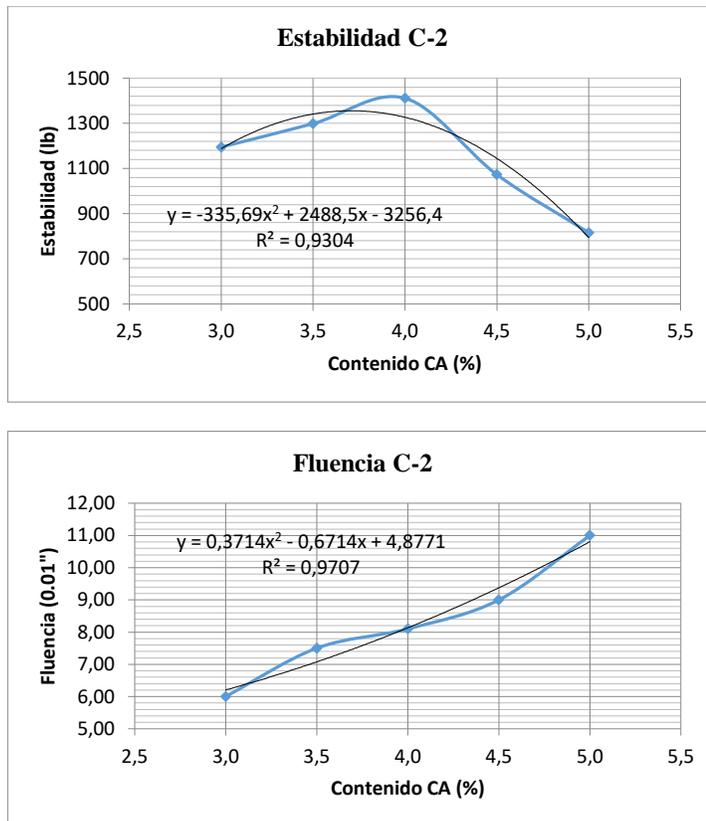
Tabla 3.59 Contenido de CA para la máxima estabilidad C-1

N° de Curva	Ecuación CA vs Estabilidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la Max Estabilidad	Estabilidad Máxima
	R	a	b	c		lb
C-1	0.94	-176.39	2104.60	-4481.90	5.97	1795.87

Fuente: Elaboración propia

3.4.14.2. Curva 2

Gráfico 3.28 Estabilidad, Fluencia C-2



Fuente: Elaboración propia

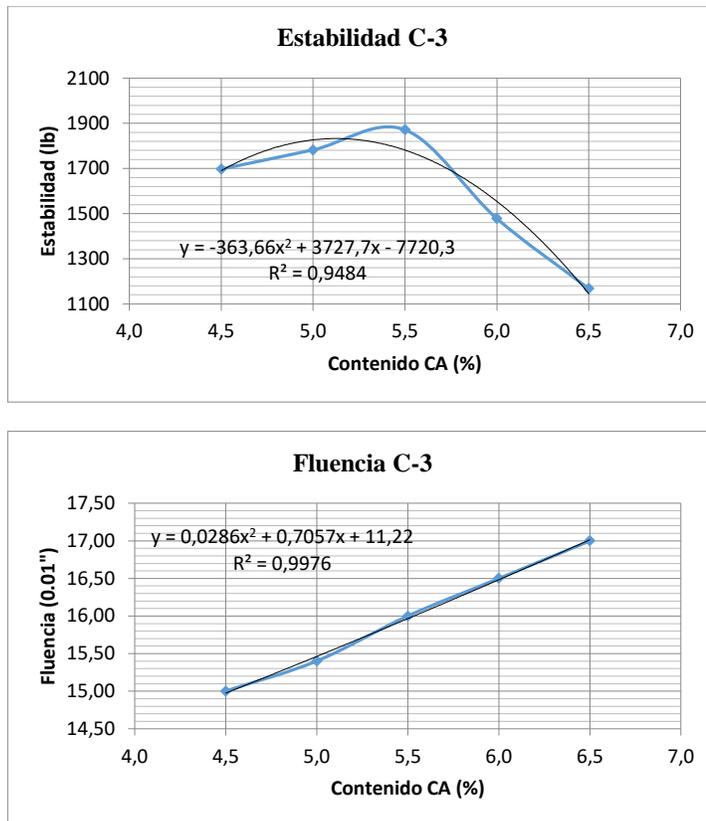
Tabla 3.60 Contenido de CA para la máxima estabilidad C-2

N° de Curva	Ecuación CA vs Estabilidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la Max Estabilidad	Estabilidad Máxima
	R	A	b	c		lb
C-2	0.93	-335.69	2488.50	-3256.40	3.71	1355.47

Fuente: Elaboración propia

3.4.14.3. Curva 3

Gráfico 3.29 Estabilidad, Fluencia C-3



Fuente: Elaboración propia

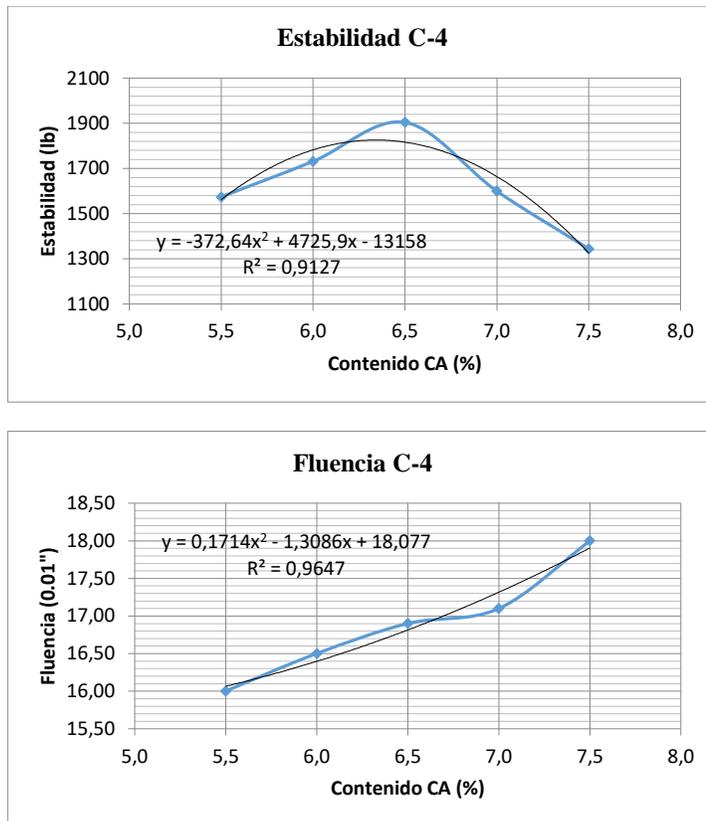
Tabla 3.61 Contenido de CA para la máxima estabilidad C-3

N° de Curva	Ecuación CA vs Estabilidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la Max Estabilidad	Estabilidad Máxima
	R	a	b	c		lb
C-3	0.95	-363.66	3727.70	-7720.30	5.13	1832.41

Fuente: Elaboración propia

3.4.14.4. Curva 4

Gráfico 3.30 Estabilidad, Fluencia C-4



Fuente: Elaboración propia

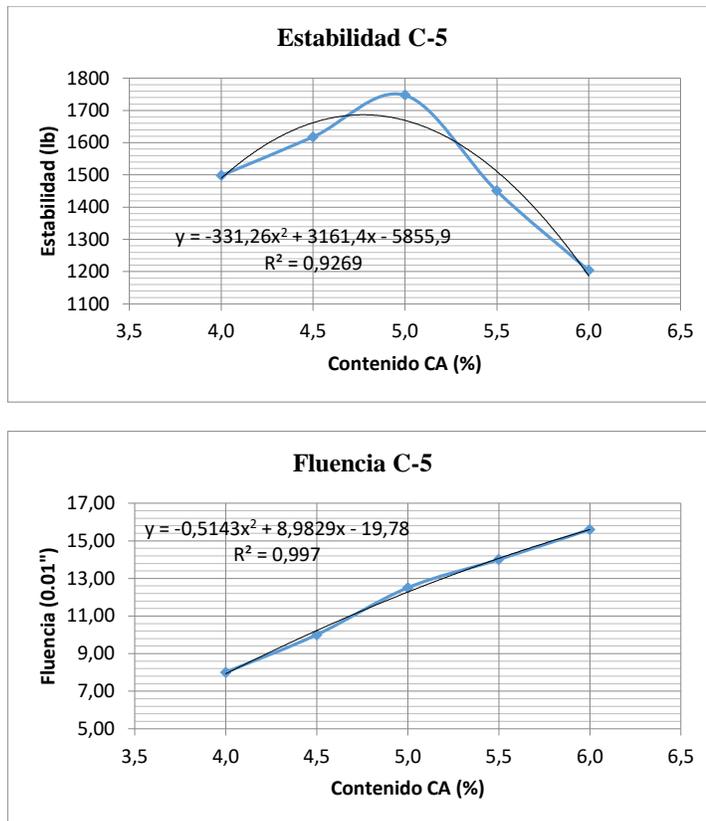
Tabla 3.62 Contenido de CA para la máxima estabilidad C-4

N° de Curva	Ecuación CA vs Estabilidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la Max Estabilidad	Estabilidad Máxima
	R	a	b	c		lb
C-4	0.91	-372.64	4725.90	-13158.00	6.34	1825.72

Fuente: Elaboración propia

3.4.14.5. Curva 5

Gráfico 3.31 Estabilidad, Fluencia C-5



Fuente: Elaboración propia

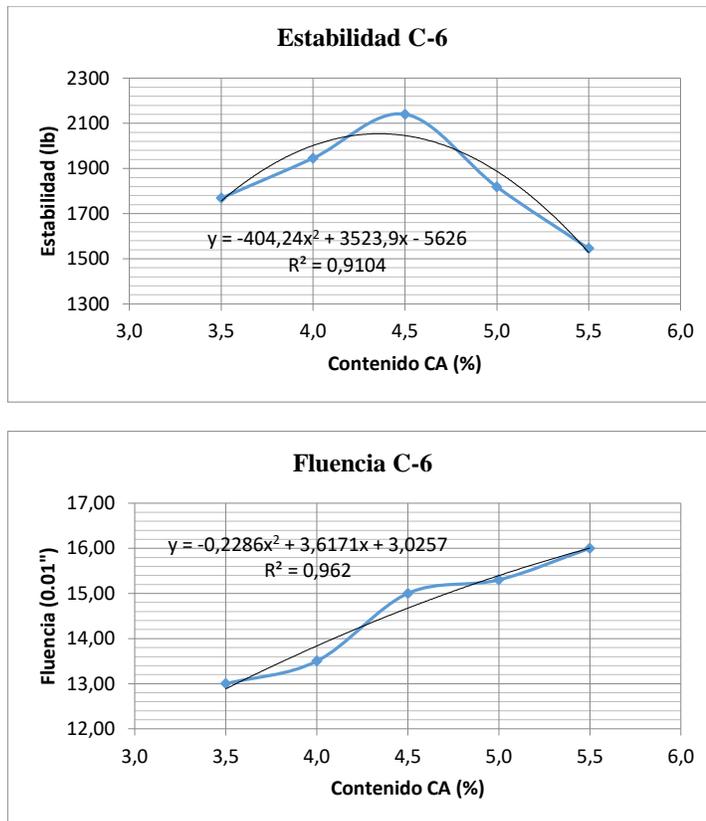
Tabla 3.63 Contenido de CA para la máxima estabilidad C-5

N° de Curva	Ecuación CA vs Estabilidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la Max Estabilidad	Estabilidad Máxima
	R	a	b	c		lb
C-5	0.93	-331.26	3161.40	-5855.90	4.77	1686.85

Fuente: Elaboración propia

3.4.14.6. Curva 6

Gráfico 3.32 Estabilidad, Fluencia C-6



Fuente: Elaboración propia

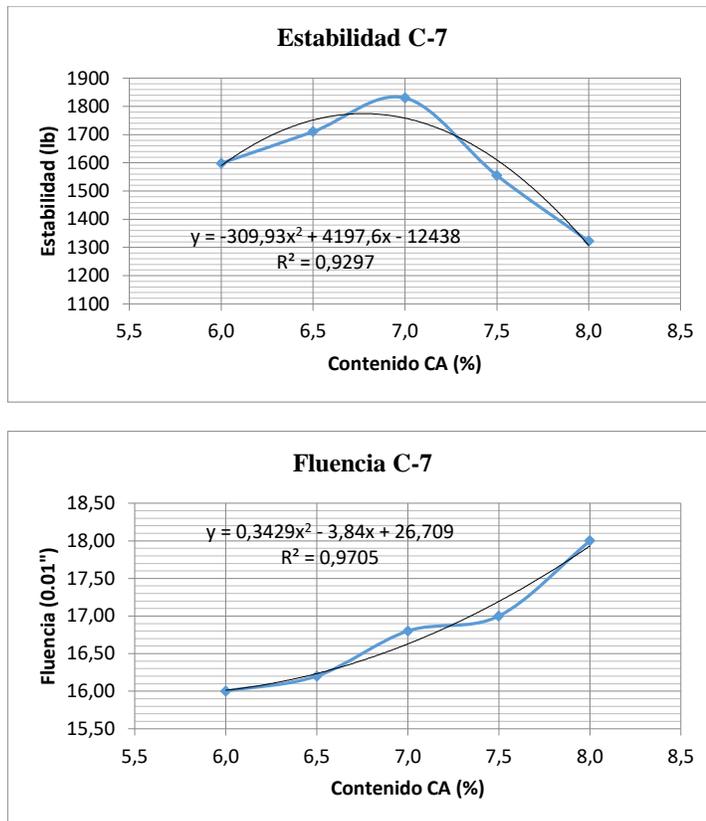
Tabla 3.64 Contenido de CA para la máxima estabilidad C-6

N° de Curva	Ecuación CA vs Estabilidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la Max Estabilidad	Estabilidad Máxima
	R	a	b	c		lb
C-6	0.91	-404.24	3523.90	-5626.00	4.36	2053.76

Fuente: Elaboración propia

3.4.14.7. Curva 7

Gráfico 3.33 Estabilidad, Fluencia C-7



Fuente: Elaboración propia

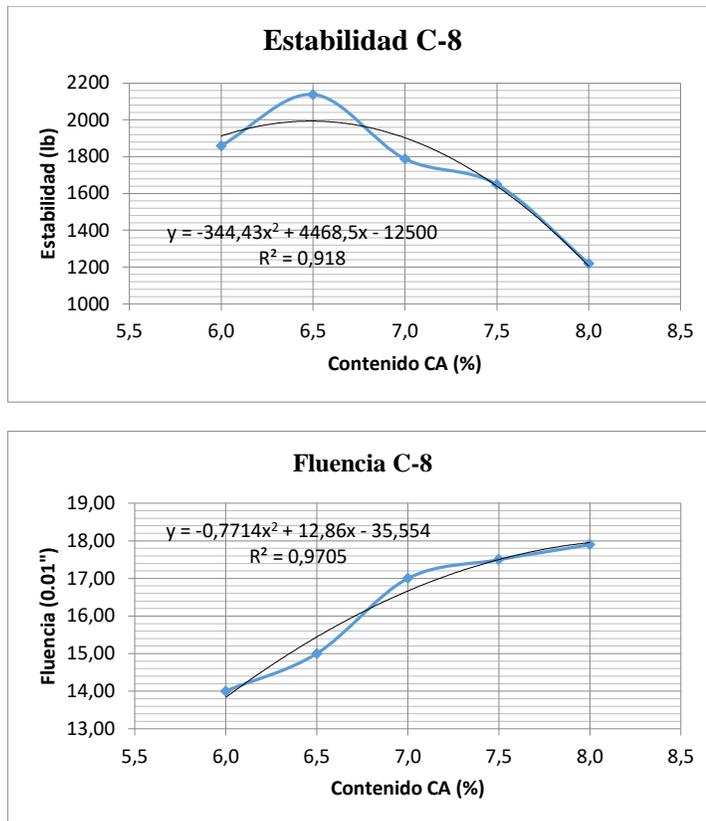
Tabla 3.65 Contenido de CA para la máxima estabilidad C-7

N° de Curva	Ecuación CA vs Estabilidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la Max Estabilidad	Estabilidad Máxima
	R	a	b	c		lb
C-7	0.93	-309.93	4197.60	-12438.00	6.77	1774.76

Fuente: Elaboración propia

3.4.14.8. Curva 8

Gráfico 3.34 Estabilidad, Fluencia C-8



Fuente: Elaboración propia

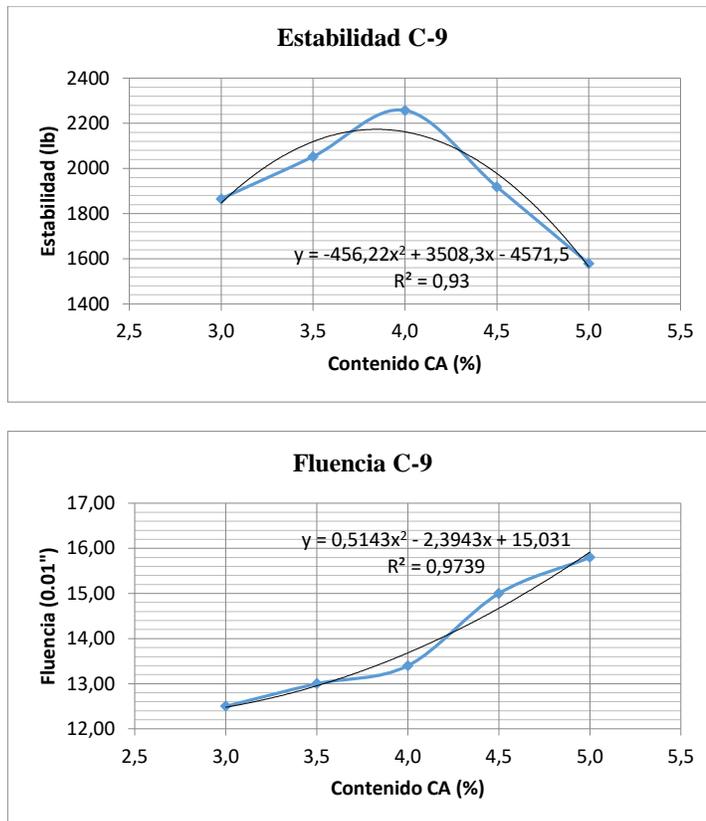
Tabla 3.66 Contenido de CA para la máxima estabilidad C-8

N° de Curva	Ecuación CA vs Estabilidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la Max Estabilidad	Estabilidad Máxima lb
	R	a	b	c		
C-8	0.92	-344.43	4468.50	-12500.00	6.49	1993.14

Fuente: Elaboración propia

3.4.14.9. Curva 9

Gráfico 3.35 Estabilidad, Fluencia C-9



Fuente: Elaboración propia

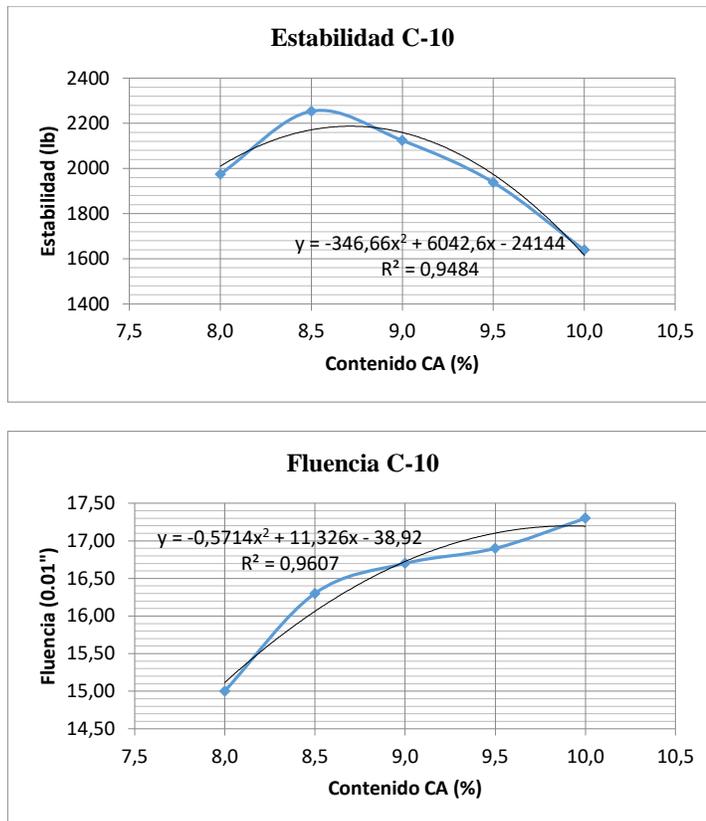
Tabla 3.67 Contenido de c CA para la máxima estabilidad C-9

N° de Curva	Ecuación CA vs Estabilidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la Max Estabilidad	Estabilidad Máxima
	R	a	b	c		lb
C-9	0.93	-478.00	3508.30	-4571.50	3.67	1865.83

Fuente: Elaboración propia

3.4.14.10. Curva 10

Gráfico 3.36 Estabilidad, Fluencia C-10



Fuente: Elaboración propia

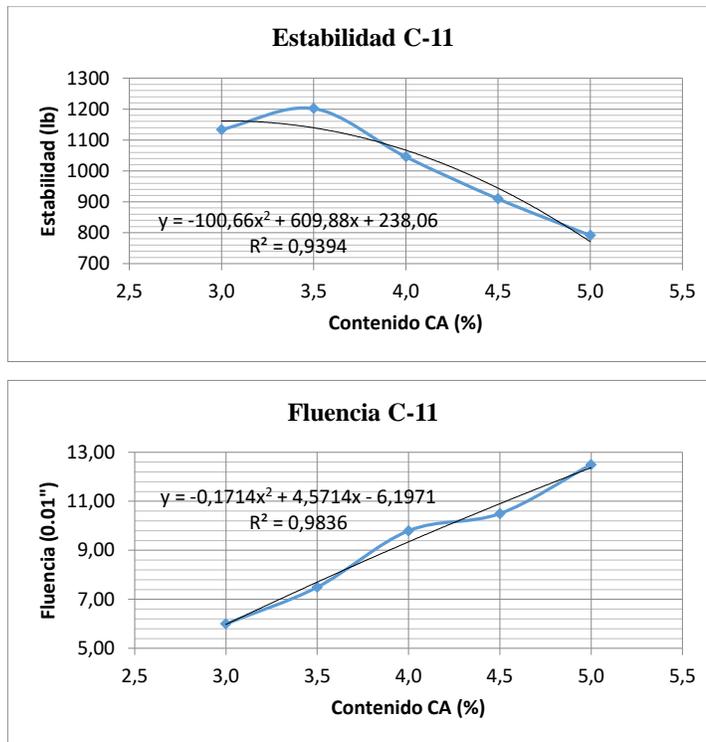
Tabla 3.68 Contenido de CA para la máxima estabilidad C-10

N° de Curva	Ecuación CA vs Estabilidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la Max Estabilidad	Estabilidad Máxima lb
	R	a	b	c		
C-10	0.95	-346.66	6042.60	-24144.00	8.72	2188.01

Fuente: Elaboración propia

3.4.14.11. Curva 11

Gráfico 3.37 Estabilidad, Fluencia C-11



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.69 Contenido de CA para la máxima estabilidad C-11

N° de Curva	Ecuación CA vs Estabilidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la Max Estabilidad	Estabilidad Máxima lb
	R	a	b	c		
C-11	0.94	-100.66	609.88	238.06	3.03	1161.85

Fuente: Elaboración propia

3.4.14.12. Análisis de resultados

En todos los tipos de curvas se observa que hasta cierto punto, los valores de estabilidad aumentan a medida que el contenido de asfalto aumenta, más allá de este punto, la estabilidad disminuye con cualquier aumento en el contenido de asfalto.

Es decir a pesar de la variación de proporciones de los tipos de agregado pétreo, el comportamiento de la estabilidad de las probetas con relación del cemento asfáltico es similar.

La fluencia tiene una relación proporcional con el contenido de cemento asfáltico, es decir, si se aumenta el asfalto, la fluencia también aumentará.

Una curva polinómica creciente de segundo grado es la que mejor simula su comportamiento pues los valores de correlación ascienden de 0.9.

3.4.15. Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

Tabla 3.70 Determinación del porcentaje óptimo de CA

N° de curva	Ecuación CA Vs Densidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la max densidad	Densidad máxima gr/cm ³	Ecuación CA Vs Estabilidad $y = ax^2 + bx + c$				% CA para la max estabilidad	Estabilidad máxima lb
	R	a	b	c			R	a	b	c		
C-1	0.96	-0.0456	0.6424	-0.02	7.04	2.24	0.94	-176.39	2104.60	-4481.90	5.97	1795.87
C-2	0.97	-0.0502	0.4322	1.23	4.30	2.16	0.93	-335.69	2488.50	-3256.40	3.71	1355.47
C-3	0.89	-0.0455	0.5327	0.69	5.85	2.25	0.95	-363.66	3727.70	-7720.30	5.13	1832.41
C-4	0.97	-0.0393	0.4990	0.6912	6.35	2.28	0.91	-372.64	4725.90	-13158.00	6.34	1825.72
C-5	0.97	-0.0554	0.5152	1.02	4.65	2.22	0.93	-331.26	3161.40	-5855.90	4.77	1686.85
C-6	0.88	-0.0238	0.2175	1.78	4.57	2.28	0.91	-404.24	3523.90	-5626.00	4.36	2053.76
C-7	0.93	-0.0896	1.1599	-1.55	6.47	2.20	0.93	-309.93	4197.60	-12438.00	6.77	1774.76
C-8	0.85	-0.0501	0.6940	-0.08	6.93	2.33	0.92	-344.43	4468.50	-12500.00	6.49	1993.14
C-9	0.95	-0.0477	0.4027	1.42	4.22	2.27	0.93	-478.00	3508.30	-4571.50	3.67	1865.83
C-10	0.97	-0.0346	0.6212	0.42	8.98	3.21	0.95	-346.66	6042.60	-24144.00	8.72	2188.01
C-11	0.87	-0.0505	0.4014	1.40	3.97	2.20	0.94	-100.66	609.88	238.06	3.03	1161.85

N° de curva	Ecuación CA Vs VA $y = ax^2 + bx + c$				% CA para 5% de Va	% de huecos de aire (Va)	% CA Óptimo	Estabilidad	Fluencia	Densidad
	R	A	b	c	Máx	%		lb	0.01"	gr/cm ³
C-1	0.98	2.0008	-29.48	109.7	5.97	5.00	6.33	1772.80	17.22	2.22
C-2	0.98	2.0628	-19.056	51.636	4.63	5.00	4.21	1269.62	8.64	2.16
C-3	0.96	1.9036	-23.634	77.005	5.36	5.00	5.45	1794.52	15.91	2.24
C-4	0.97	1.7265	-23.224	78.484	5.09	5.00	5.93	1761.76	16.34	2.27
C-5	0.99	0.777	-9.2692	31.574	4.79	5.00	4.74	1686.46	11.22	2.22
C-6	0.98	0.9992	-10.458	30.759	3.97	5.00	4.30	2052.27	14.35	2.28
C-7	0.99	0.3617	-6.7272	31.737	5.76	5.00	6.33	1715.17	16.14	2.20
C-8	0.90	2.0934	-30.241	111.85	6.16	5.00	6.52	1992.66	15.51	2.32
C-9	0.98	2.0003	-18.197	44.943	3.70	5.00	3.86	1847.90	13.44	2.27
C-10	0.99	1.43	-26.926	128.66	7.94	5.00	8.55	2178.01	16.14	3.20
C-11	0.95	3.0243	-25.478	59.115	4.36	5.00	3.79	1103.94	8.66	2.20

Fuente: Elaboración propia

Al ser las curvas de densidad y estabilidad simuladas por una curva polinómica de segundo grado, pues los valores de correlación de Pearson son mayores a 0.85, entonces, para el encontrar el valor máximo se derivó con respecto a la variable dependiente (contenido de CA), a partir de estos valores y encontrando el contenido de CA, para un porcentaje de vacíos de 5%, se obtuvo el contenido óptimo con el promedio aritmético de los tres contenidos mencionados anteriormente.

Tabla 3.71 Verificación del porcentaje óptimo calculado

N° de curva	% de Huecos de aire (Va)	3%<Va<5%	TMN	Vacíos agregado mineral (V.A.M.)	Porcentaje mínimo de V.A.M.	V.A.M. >Mín.	% de Huecos llenos de asfalto (VLL)	65%<%VLL<75%	
	%		mm	%	%		%	> 65%	< 75%
C-1	5.00	Cumple	19.00	17.08	12.00	Cumple	81.21	Cumple	No Cumple
C-2	5.00	Cumple	37.50	16.90	10.00	Cumple	52.58	No Cumple	Cumple
C-3	5.00	Cumple	25.00	16.77	11.00	Cumple	71.49	Cumple	Cumple
C-4	5.00	Cumple	25.00	14.72	11.00	Cumple	89.93	Cumple	No Cumple
C-5	5.00	Cumple	37.50	15.38	10.00	Cumple	66.97	Cumple	Cumple
C-6	5.00	Cumple	19.00	13.89	12.00	Cumple	69.30	Cumple	Cumple
C-7	5.00	Cumple	37.50	16.36	10.00	Cumple	80.64	Cumple	No Cumple
C-8	5.00	Cumple	25.00	12.77	11.00	Cumple	71.68	Cumple	Cumple
C-9	5.00	Cumple	25.00	13.12	11.00	Cumple	65.95	Cumple	Cumple
C-10	5.00	Cumple	9.50	14.11	14.00	Cumple	78.91	Cumple	No Cumple
C-11	5.00	Cumple	37.50	15.00	10.00	Cumple	54.82	No Cumple	Cumple

N° de curva	Estabilidad	Estabilidad >1800 lb	Fluencia	Verificación 8(0.01")<Fluencia>14(0.01")	
	lb	> 1800 lb	0.01"	> 8 (0.01")	< 14 (0.01")
C-1	1772.80	Cumple	17.22	Cumple	No Cumple
C-2	1269.62	Cumple	8.64	Cumple	Cumple
C-3	1794.52	Cumple	15.91	Cumple	Cumple
C-4	1761.76	Cumple	16.34	Cumple	No Cumple
C-5	1686.46	Cumple	11.22	Cumple	Cumple
C-6	2052.27	Cumple	14.35	Cumple	Cumple
C-7	1715.17	Cumple	16.14	Cumple	No Cumple
C-8	1992.66	Cumple	15.51	Cumple	Cumple
C-9	1847.90	Cumple	13.44	Cumple	Cumple
C-10	2178.01	Cumple	16.14	Cumple	No Cumple
C-11	1103.94	Cumple	8.66	Cumple	Cumple

Fuente: Elaboración propia

La norma exige que el porcentaje de vacíos sea mayor que un 3% y menor al 5%, para este trabajo se buscó un contenido de cemento asfáltico que cumpla con un vacío de 5%, por tanto todas las combinaciones cumplen con los requerimientos de vacíos, los vacíos de agregado mineral también se verifican en todas las curvas, pues todas las mezclas pasan el mínimo requerido, es decir a pesar de variar el agregado pétreo grueso, fino y el Filler, mientras se encuentre dentro de la franja normada por la ABC, o imite la forma de su curvatura se cumplirá con las especificaciones de vacíos y vacíos de agregado mineral.

En la curva 1 el vacío lleno de asfalto sobrepasa los límites establecidos por la norma, pues su contenido de finos es de los más bajos, es decir la granulometría incide de forma directa en esta característica física, mientras que la curva 2 al contrario no cumple con el mínimo de VLL, debido a su alto contenido de pétreo fino. El resto de las curvas que no cumplen con los límites de VLL es por que sus contenidos de finos son picos altos o bajos.

En cambio en las curvas donde se cumplen las especificaciones de VLL tienen una contenidos de agregado fino y grueso más parejo, no existe mucha diferencia entre sus proporciones tal como el caso de la curva 9 (curva que se adoptó como modelo).

En el caso de la estabilidad todas combinaciones granulométricas cumplen con el mínimo requerido, es decir la incidencia de la granulometría se observa en el ascenso o descenso de su valor, pues mientras se halle dentro de la franja TM-40c (franja normada por la ABC), o se imite la forma de la curvatura se cumplirá con las especificaciones de estabilidad.

En el caso de la fluencia no es la misma forma de incidir de la granulometría, pues todas las curvas cumplen con el mínimo, pero algunas sobrepasan el máximo, esto se debe a su contenido alto de Filler, este agregado debilita la combinación dando deformaciones altas.

A continuación de presentarán tablas que estarán ordenadas en forma descendente de acuerdo a su valor de contenido de cemento asfáltico, estabilidad, fluencia, densidad. y vacíos de agregado mineral.

Tabla 3.72 Porcentajes de agregados y contenido de CA

	Grueso (%)	Fino (%)	Filler (%)	% CA Óptimo
Curva 10	60	20	20	8.55
Curva 8	35	50	15	6.52
Curva 7	20	50	15	6.33
Curva 1	50	35	15	6.33
Curva 4	45	42.5	12.5	5.93
Curva 3	40	50	10	5.45
Curva 5	35	57.5	7.5	4.74
Curva 6	60	35	5	4.30
Curva 2	30	65	5	4.21
Curva 9	45	50	5	3.86
Curva 11	20	80	0	3.79

Fuente: Elaboración propia

En el contenido óptimo de cemento asfáltico se puede observar que decrece a medida que el porcentaje de Filler decrece, entonces la incidencia del Filler con respecto al contenido óptimo de cemento asfáltico es directa.

Tabla 3.73 Porcentajes de agregados y estabilidad

	Grueso (%)	Fino (%)	Polvo (%)	Estabilidad (lb)
Curva 10	60	20	20	2178.01
Curva 6	60	35	5	2052.27
Curva 8	35	50	15	1992.66
Curva 9	45	50	5	1847.90
Curva 3	40	50	10	1794.52
Curva 1	50	35	15	1772.80
Curva 4	45	42.5	12.5	1761.76
Curva 7	20	50	15	1715.17
Curva 5	35	57.5	7.5	1686.46
Curva 2	30	65	5	1269.62
Curva 11	20	80	0	1103.94

Fuente: Elaboración propia

La variación de estabilidad depende directamente del contenido de agregado grueso, pues el agregado grueso determina la dureza de la mezcla.

Tabla 3.74 Porcentajes de agregados y fluencia

	Grueso (%)	Fino (%)	Filler (%)	Fluencia (0.01")
Curva 1	50	35	15	17.22
Curva 4	45	42.5	12.5	16.34
Curva 7	20	50	15	16.14
Curva 10	60	20	20	16.14
Curva 3	40	50	10	15.91
Curva 8	35	50	15	15.51
Curva 6	60	35	5	14.35
Curva 9	45	50	5	13.44
Curva 5	35	57.5	7.5	11.22
Curva 11	20	80	0	8.66
Curva 2	30	65	5	8.64

Fuente: Elaboración propia

En la estabilidad el material que incide directamente es el Filler, debido a que este material reducirá la dureza de las mezclas, entonces a medida que el Filler se reduzca la fluencia descenderá.

Tabla 3.75 Porcentajes de agregados y densidad

	Grueso (%)	Fino (%)	Polvo (%)	Densidad (gr/cm3)
Curva 10	60	20	20	3.20
Curva 8	35	50	15	2.32
Curva 6	60	35	5	2.28
Curva 9	45	50	5	2.27
Curva 4	45	42.5	12.5	2.27
Curva 3	40	50	10	2.24
Curva 1	50	35	15	2.22
Curva 5	35	57.5	7.5	2.22
Curva 7	20	50	15	2.20
Curva 11	20	80	0	2.20
Curva 2	30	65	5	2.16

Fuente: Elaboración propia

La densidad desciende de acuerdo a la proporción del agregado grueso, fino y Filler, a medida que estos tienen proporciones más desiguales, la densidad se aminora, pues si existe más vacío la densidad es menor.

Tabla 3.76 Porcentajes de agregados y VAM

	Grueso (%)	Fino (%)	Filler (%)	V.A.M. (%)
Curva 1	50	35	15	17.08
Curva 2	30	65	5	16.90
Curva 3	40	50	10	16.77
Curva 7	20	50	15	16.36
Curva 5	35	57.5	7.5	15.38
Curva 11	20	80	0	15.00
Curva 4	45	42.5	12.5	14.72
Curva 10	60	20	20	14.11
Curva 6	60	35	5	13.89
Curva 9	45	50	5	13.12
Curva 8	35	50	15	12.77

Fuente: Elaboración propia

El vacío de agregado mineral desciende de acuerdo a la ponderación del agregado grueso y el Filler a medida que estos decrecen, disminuye el VAM.

3.5. EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA DE LA GRANULOMETRIA DE AGREGADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.5.1. Análisis de los resultados de contenido óptimo de cemento asfáltico

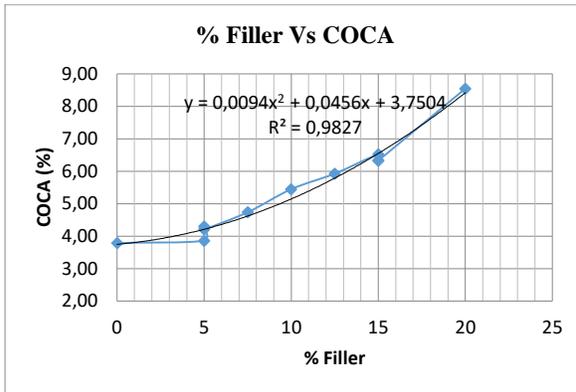
El análisis de los resultados de contenido de Cemento Óptimo de Cemento Asfáltico (COCA), se realizó solo con el porcentaje de Filler, pues el cemento asfáltico depende directamente del contenido de éste.

Tabla 3.77 Resultados de contenido de Filler en relación con COCA

	Filler (%)	COCA (%)	Dif. de agregado con una curva modelo (%)	Dif. de COCA con una curva modelo (%)
Curva 10	20	8.55	15.00	121.19
Curva 1	15	6.33	10.00	63.78
Curva 7	15	6.33	10.00	63.93
Curva 8	15	6.52	10.00	68.87
Curva 4	12.5	5.93	7.50	53.41
Curva 3	10	5.45	5.00	41.01
Curva 5	7.5	4.74	2.50	22.62
Curva 2	5	4.21	0.00	9.03
Curva 6	5	4.30	0.00	11.24
Curva 9	5	3.86	0.00	0.00
Curva 11	0	3.79	-5.00	-1.96

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.38 %Filler Vs %COCA



Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en el gráfico de contenido óptimo de cemento asfáltico, la curva que solicita mayor cantidad de asfalto es la curva 10, que tiene la mayor cantidad de Filler, y la curva con menor requerimientos de asfalto es la curva 11, que tiene cero polvo, se puede observar que a medida que el Filler aumenta su porcentaje, también crece la cantidad de cemento asfáltico.

3.5.2. Análisis de los resultados de densidad

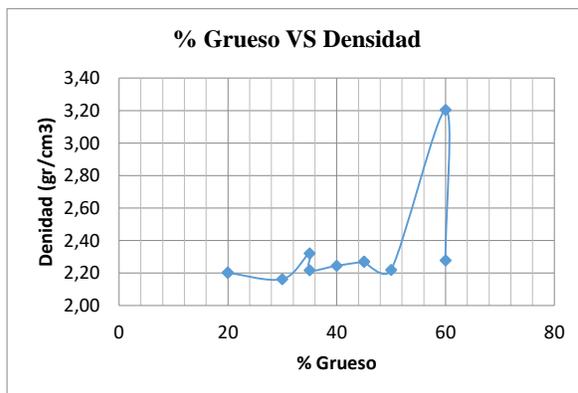
3.5.2.1. % Material grueso en relación con densidad

Tabla 3.78 % Material grueso en relación con densidad

	Grueso (%)	Densidad (gr/cm ³)	Dif. de agregado con una curva modelo (%)	Dif. de Densidad con una curva modelo (%)
Curva 6	60	2.28	15.00	0.38
Curva 10	60	3.20	15.00	41.19
Curva 1	50	2.22	5.00	-2.24
Curva 4	45	2.27	0.00	-0.01
Curva 9	45	2.27	0.00	0.00
Curva 3	40	2.24	-5.00	-1.10
Curva 5	35	2.22	-10.00	-2.32
Curva 8	35	2.32	-10.00	2.26
Curva 2	30	2.16	-15.00	-4.77
Curva 7	20	2.20	-25.00	-2.95
Curva 11	20	2.20	-25.00	-2.98

Fuente: Elaboración propia

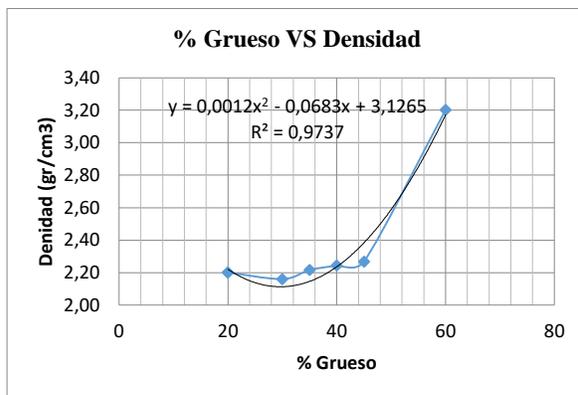
Gráfico 3.39 % Material Grueso Vs Densidad 1



Fuente: Elaboración propia

La curva % Grueso Vs Densidad muestra una ligera tendencia a crecer a medida que el material grueso aumenta, pero se ven también picos que deforman la proporcionalidad de la curva, estos picos son las curvas discontinuas, las que tienen saltos en el tamaño de agregado. A continuación se mostrará una grafica sin tomar en cuenta las curvas con discontinuidad.

Gráfico 3.40 % Material Grueso Vs Densidad 2



Fuente: Elaboración propia

Como se había mencionado líneas arriba, la proporcionalidad entre la cantidad de material grueso y la densidad sucederá siempre y cuando las granulometrías no tengan saltos bruscos en el tamaño d agregado.

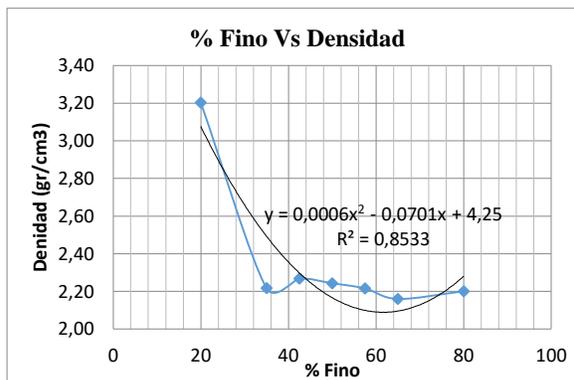
3.5.2.2. % Material fino en relación con densidad

Tabla 3.79 % Material fino en relación con densidad

	Fino (%)	Densidad (gr/cm ³)	Dif. de agregado con una curva modelo (%)	Dif. de Densidad con una curva modelo (%)
Curva 11	80	2.20	30.00	-2.98
Curva 2	65	2.16	15.00	-4.77
Curva 5	57.5	2.22	7.50	-2.32
Curva 3	50	2.24	0.00	-1.10
Curva 7	50	2.20	0.00	-2.95
Curva 8	50	2.32	0.00	2.26
Curva 9	50	2.27	0.00	0.00
Curva 4	42.5	2.27	-7.50	-0.01
Curva 1	35	2.22	-15.00	-2.24
Curva 6	35	2.28	-15.00	0.38
Curva 10	20	3.20	-30.00	41.19

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.41 % Material Fino Vs Densidad



Fuente: Elaboración propia

La curva % Fino Vs Densidad muestra una tendencia de decrecimiento de la densidad a medida que el porcentaje de material fino aumenta, en este caso las discontinuidades no muestran un comportamiento diferente a la proporcionalidad establecida.

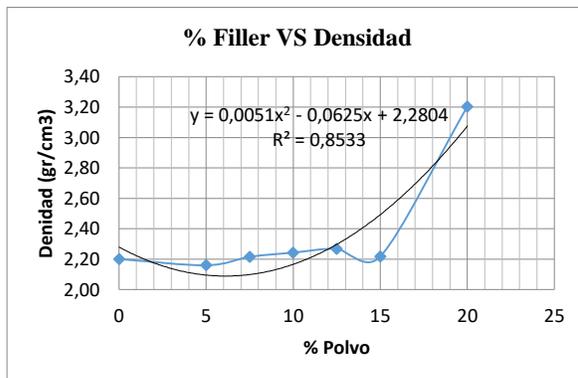
3.5.2.3. % Material Filler en relación con densidad

Tabla 3.80 % Material Filler en relación con densidad

	Filler (%)	Densidad (gr/cm3)	Dif. de agregado con una curva modelo (%)	Dif. de Densidad con una curva modelo (%)
Curva 10	20	3.20	15.00	41.19
Curva 1	15	2.22	10.00	-2.24
Curva 7	15	2.20	10.00	-2.95
Curva 8	15	2.32	10.00	2.26
Curva 4	12.5	2.27	7.50	-0.01
Curva 3	10	2.24	5.00	-1.10
Curva 5	7.5	2.22	2.50	-2.32
Curva 2	5	2.16	0.00	-4.77
Curva 6	5	2.28	0.00	0.38
Curva 9	5	2.27	0.00	0.00
Curva 11	0	2.20	-5.00	-2.98

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.42 % Material Filler Vs Densidad



Fuente: Elaboración propia

En la curva %Filler Vs Densidad, a medida que se aumente el porcentaje de Filler la densidad también crecerá, las curvas discontinuas no presentan un comportamiento diferente a las continuas.

3.5.3. Análisis de los resultados de la estabilidad Marshall

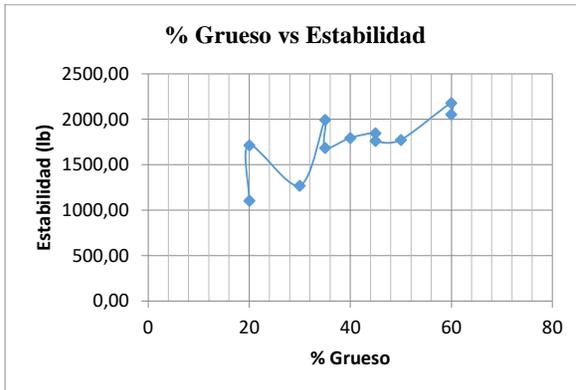
3.5.3.1. % Material grueso en relación con la estabilidad

Tabla 3.81 % Material grueso en relación con estabilidad

	Grueso (%)	Estabilidad (lb)	Dif. de agregado con una curva modelo (%)	Dif. de Estabilidad con una curva modelo (%)	Verificación Estabilidad >1800 lb
Curva 6	60	2052.27	15.00	11.06	Cumple
Curva 10	60	2178.01	15.00	17.86	Cumple
Curva 1	50	1772.80	5.00	-4.06	Cumple
Curva 4	45	1761.76	0.00	-4.66	Cumple
Curva 9	45	1847.90	0.00	0.00	Cumple
Curva 3	40	1794.52	-5.00	-2.89	Cumple
Curva 5	35	1686.46	-10.00	-8.74	Cumple
Curva 8	35	1992.66	-10.00	7.83	Cumple
Curva 2	30	1269.62	-15.00	-31.29	Cumple
Curva 7	20	1715.17	-25.00	-7.18	Cumple
Curva 11	20	1103.94	-25.00	-40.26	Cumple

Fuente: Elaboración propia

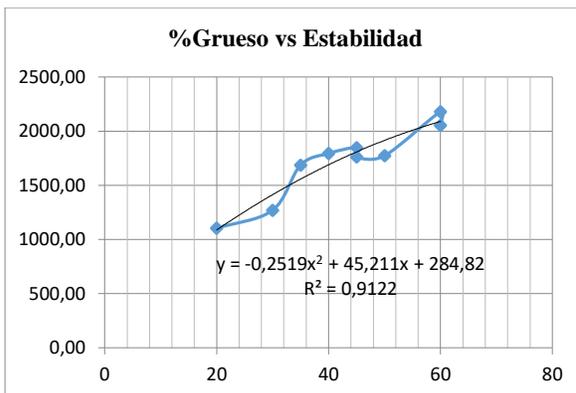
Gráfico 3.43 % Material Grueso Vs Estabilidad 1



Fuente: Elaboración propia

La curva %Grueso Vs Estabilidad, presenta tendencia a aumentar la estabilidad si se aumenta el material grueso, pero también se pueden observar picos que perturban la proporcionalidad, estos picos son las curvas discontinuas.

Gráfico 3.44 % Material Grueso Vs Estabilidad 2



Fuente: Elaboración propia

En este gráfico no se tomaron en cuenta las curvas discontinuas, por lo que la tendencia ya mencionada es más clara, por tanto la proporcionalidad de porcentaje de agregado

grueso con la estabilidad no se aplica a curvas que tengan saltos de tamaño de agregados.

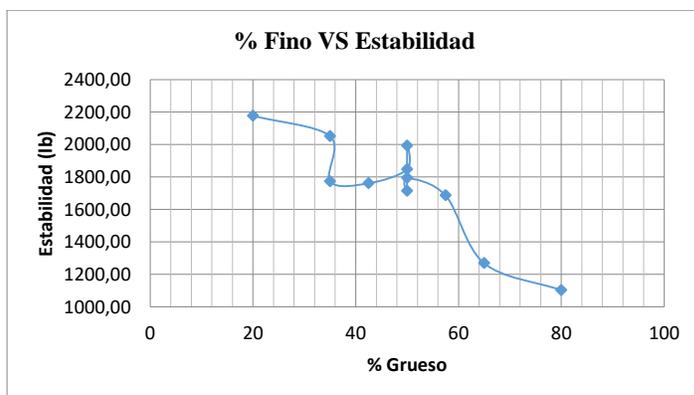
3.5.3.2. % Material fino en relación con la estabilidad

Tabla 3.82 % Material fino en relación con estabilidad

	Fino (%)	Estabilidad (lb)	Dif. de agregado con una curva modelo (%)	Dif. de Estabilidad con una curva modelo (%)	Verificación Estabilidad >1800 lb
Curva 11	80	1103.94	30.00	-40.26	Cumple
Curva 2	65	1269.62	15.00	-31.29	Cumple
Curva 5	57.5	1686.46	7.50	-8.74	Cumple
Curva 3	50	1794.52	0.00	-2.89	Cumple
Curva 7	50	1715.17	0.00	-7.18	Cumple
Curva 8	50	1992.66	0.00	7.83	Cumple
Curva 9	50	1847.90	0.00	0.00	Cumple
Curva 4	42.5	1761.76	-7.50	-4.66	Cumple
Curva 1	35	1772.80	-15.00	-4.06	Cumple
Curva 6	35	2052.27	-15.00	11.06	Cumple
Curva 10	20	2178.01	-30.00	17.86	Cumple

Fuente: Elaboración propia

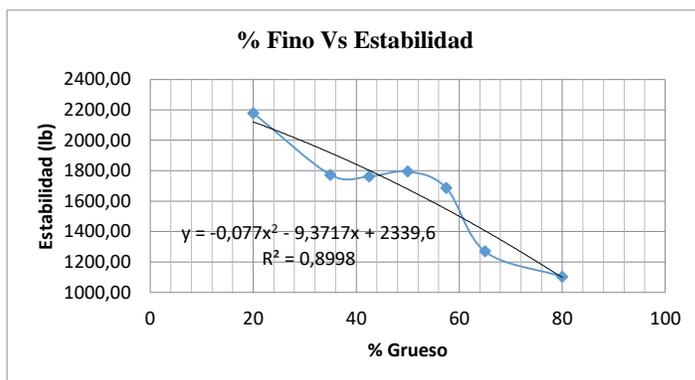
Gráfico 3.45 % Material Fino Vs Estabilidad 1



Fuente: Elaboración propia

La curva %Fino Vs Estabilidad muestra una proporcionalidad inversa, a medida que aumenta el porcentaje de finos la estabilidad decrece, los picos que perturban esta relación son las curvas discontinuas, a continuación se presentará la misma curva pero sin tomar en cuenta las curvas discontinuas.

Gráfico 3.46 % Material Fino Vs Estabilidad 2



Fuente: Elaboración propia

Esta curva muestra con más claridad la proporcionalidad inversa, también muestra que esta relación para curvas discontinuas no aplica.

3.5.3.3. % Material Filler en relación con la estabilidad

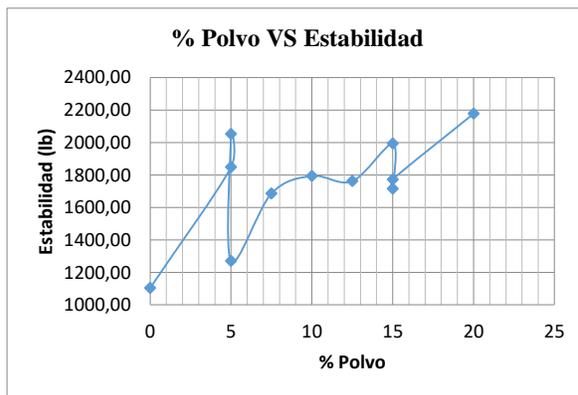
Tabla 3.83 % Material Filler en relación con estabilidad

	Filler (%)	Estabilidad (lb)	Dif. de agregado con una curva modelo (%)	Dif. de estabilidad con una curva modelo (%)	Verificación Estabilidad >1800 lb
Curva 10	20	2178.01	15.00	17.86	Cumple
Curva 1	15	1772.80	10.00	-4.06	Cumple
Curva 7	15	1715.17	10.00	-7.18	Cumple
Curva 8	15	1992.66	10.00	7.83	Cumple
Curva 4	12.5	1761.76	7.50	-4.66	Cumple
Curva 3	10	1794.52	5.00	-2.89	Cumple
Curva 5	7.5	1686.46	2.50	-8.74	Cumple
Curva 2	5	1269.62	0.00	-31.29	Cumple

Curva 6	5	2052.27	0.00	11.06	Cumple
Curva 9	5	1847.90	0.00	0.00	Cumple
Curva 11	0	1103.94	-5.00	-40.26	Cumple

Fuente: Elaboración propia

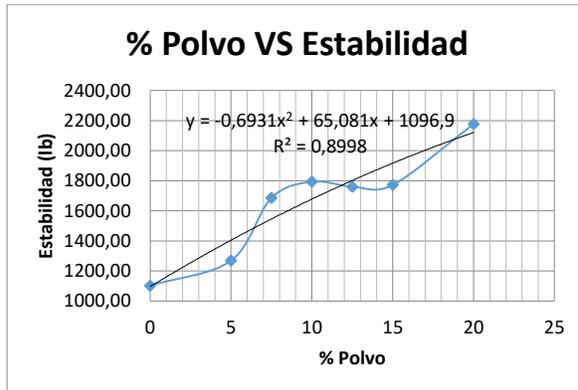
Gráfico 3.47 % Material Filler Vs Estabilidad 1



Fuente: Elaboración propia

La curva de %Filler Vs Estabilidad, tiende a crecer la estabilidad si se aumenta el porcentaje de Filler, los picos que se ven en la gráfica, son las curvas discontinuas.

A continuación se mostrará la misma gráfica sin tomar en cuenta los valores de las curvas discontinuas.

Gráfico 3.48 Material Filler Vs Estabilidad 2

Fuente: Elaboración propia

En este gráfico la relación de proporcionalidad es más clara, también refleja que esta relación aplica solo a curvas continuas.

3.5.4. Análisis de los resultados de la fluencia Marshall

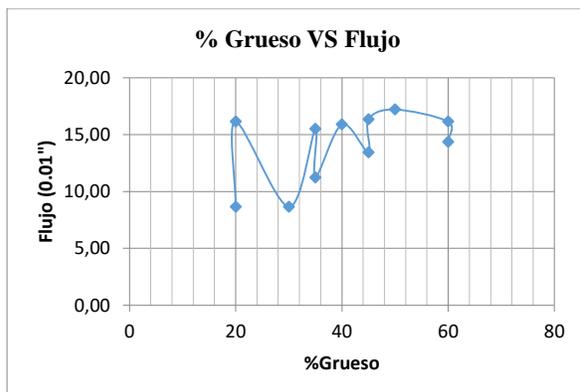
3.5.4.1. % Material grueso en relación con la fluencia

Tabla 3.84 % Material grueso en relación con fluencia

	Grueso (%)	Fluencia (0.01")	Dif. de agreg. con una curva modelo (%)	Dif. de fluencia con una curva modelo (%)	Verificación 8<Fluencia>14 (0.01")
Curva 6	60	14.35	15.00	6.73	No cumple
Curva 10	60	16.14	15.00	20.05	No cumple
Curva 1	50	17.22	5.00	28.11	No cumple
Curva 4	45	16.34	0.00	21.56	No cumple
Curva 9	45	13.44	0.00	0.00	Cumple
Curva 3	40	15.91	-5.00	18.37	No cumple
Curva 5	35	11.22	-10.00	-16.52	Cumple
Curva 8	35	15.51	-10.00	15.39	No cumple
Curva 2	30	8.64	-15.00	-35.74	Cumple
Curva 7	20	16.14	-25.00	20.08	No cumple
Curva 11	20	8.66	-25.00	-35.59	Cumple

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.49 %Material Grueso Vs Fluencia 1

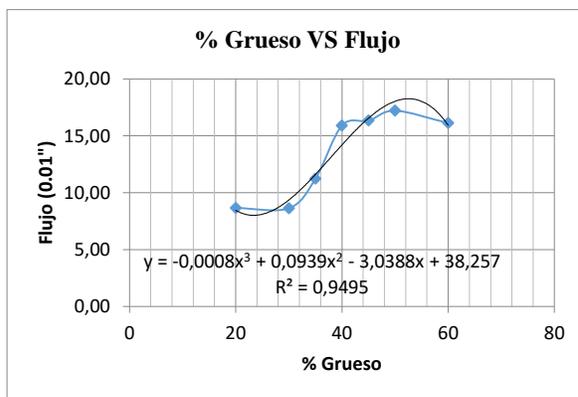


Fuente: Elaboración propia

La curva de % Grueso Vs Fluencia muestra que crece la fluencia si se aumenta el porcentaje de agregado grueso, los picos que se ven en la gráfica, son las curvas discontinuas.

A continuación se mostrará la misma gráfica sin tomar en cuenta los valores de las curvas discontinuas.

Gráfico 3.50 %Material Grueso Vs Fluencia 2



Fuente: Elaboración propia

Esta curva muestra con más claridad la proporcionalidad entre el porcentaje de agregado grueso y la fluencia, también muestra que esta relación no aplica para curvas discontinuas.

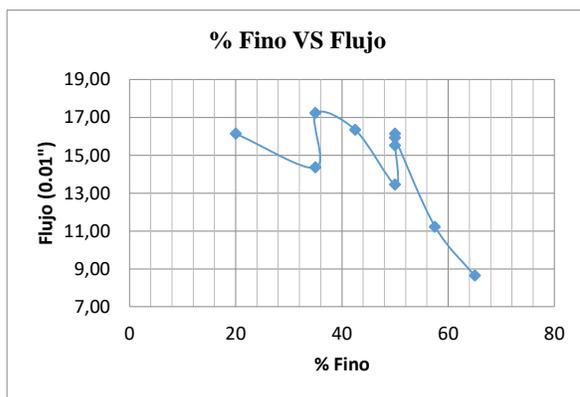
3.5.4.2. % Material fino en relación con la fluencia

Tabla 3.85 Material fino en relación con fluencia

	Fino (%)	Fluencia (0.01")	Dif. de agreg. con una curva modelo (%)	Dif. de Fluencia con una curva modelo (%)	Verificación 8<Fluencia>14 (0.01")
Curva 2	65	8.64	15.00	-35.74	Cumple
Curva 5	57.5	11.22	7.50	-16.52	Cumple
Curva 3	50	15.91	0.00	18.37	No Cumple
Curva 7	50	16.14	0.00	20.08	No Cumple
Curva 8	50	15.51	0.00	15.39	No Cumple
Curva 9	50	13.44	0.00	0.00	Cumple
Curva 4	42.5	16.34	-7.50	21.56	No Cumple
Curva 1	35	17.22	-15.00	28.11	No Cumple
Curva 6	35	14.35	-15.00	6.73	No Cumple
Curva 10	20	16.14	-30.00	20.05	No Cumple

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.51 %Material Fino Vs Fluencia 1

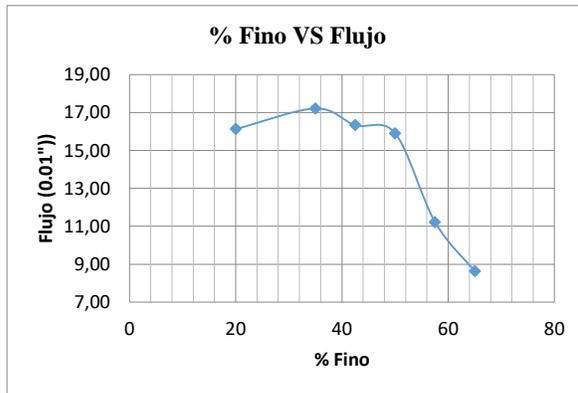


Fuente: Elaboración propia

La curva % Fino Vs Fluencia muestra una proporcionalidad inversa, a medida que aumenta el porcentaje de finos el fluencia decrece, los picos que perturban esta relación

son las curvas discontinuas, a continuación se presentará la misma curva pero sin tomar en cuenta las curvas discontinuas.

Gráfico 3.52 %Material Fino Vs Fluencia 2



Fuente: Elaboración propia

Esta curva muestra más claramente la proporcionalidad inversa, también señala que esta relación solo aplica para curvas continuas.

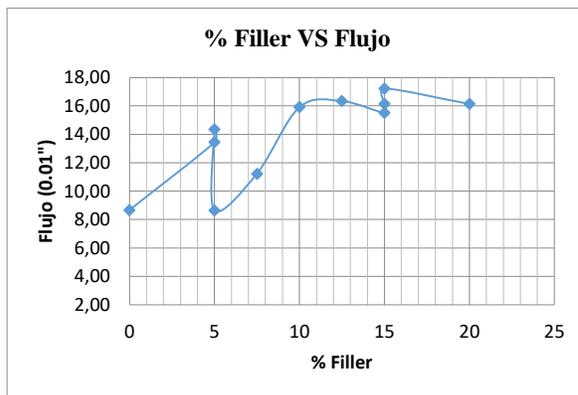
3.5.4.3. % Material Filler en relación con la fluencia

Tabla 3.86 Material Filler en relación con fluencia

	Filler (%)	Estb. (lb)	Dif. de agregado con una curva modelo (%)	Dif. de Estabilidad con una curva modelo (%)	Verificación Estabilidad >1800 lb
Curva 10	20	16.14	15.00	20.05	No Cumple
Curva 1	15	17.22	10.00	28.11	No Cumple
Curva 7	15	16.14	10.00	20.08	No Cumple
Curva 8	15	15.51	10.00	15.39	No Cumple
Curva 4	12.5	16.34	7.50	21.56	No Cumple
Curva 3	10	15.91	5.00	18.37	No Cumple
Curva 5	7.5	11.22	2.50	-16.52	Cumple
Curva 2	5	8.64	0.00	-35.74	Cumple
Curva 6	5	14.35	0.00	6.73	No Cumple
Curva 9	5	13.44	0.00	0.00	Cumple
Curva 11	0	8.66	-5.00	-35.59	Cumple

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.53 %Material Filler Vs Fluencia 1

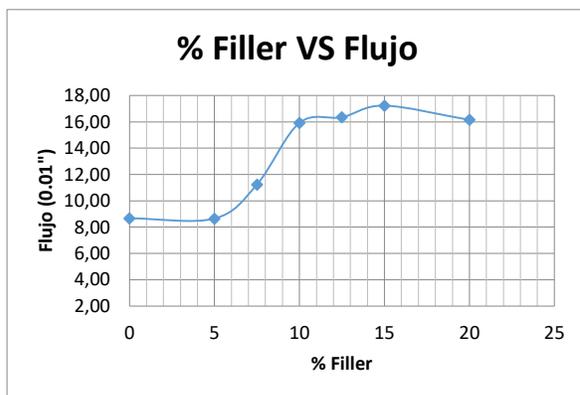


Fuente: Elaboración propia

La curva de %Filler Vs Fluencia, tiende a crecer la fluencia si se aumenta el porcentaje de polvo o Filler, los picos que se ven en la gráfica, son las curvas discontinuas.

A continuación se mostrará la misma gráfica sin tomar en cuenta los valores de las curvas discontinuas.

Gráfico 3.54 %Material Filler Vs Fluencia 2



Fuente: Elaboración propia

En este gráfico la relación de proporcionalidad es más clara, también refleja que esta relación aplica solo a curvas continuas.

En resumen la incidencia del tipo de granulometría es directa en las características físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas, como se puede observar en los resultados obtenidos.

Adoptando la curva 9 (45% grueso, 50% fino, 5% Filler), como modelo de comparación, pues esta combinación cumple con todos los requisitos Marshall, se aprecia la diferencia con las demás curvas, en las distintas características de la mezcla.

Si se aumenta la cantidad de agregado grueso hasta el máximo dentro los límites de la norma (Curva 6, 60% grueso), la estabilidad aumenta hasta 11%, mientras que la fluencia crece 2.5%, sobrepasando las especificaciones de la norma, en tanto la densidad solo sube 0.4%.

Caso contrario al quitar agregado grueso hasta el mínimo dentro de la norma (Curva 7, 20% grueso), se reduce la estabilidad 7%, la fluencia 20% dejando de cumplir con lo requerido y la densidad 3%.

En caso de acrecentar el agregado fino hasta el máximo dentro de la franja TM-40c (Curva 2, 65% fino), la estabilidad se reduce 30%, la fluencia 35% pero aún cumpliendo con lo requerido, la densidad 5%.

Si se disminuye el agregado fino hasta el mínimo dentro de la norma (Curva 6, 35% fino), la estabilidad aumenta 11%, la fluencia 7% sobrepasando la norma, y la densidad 0.4%.

Al aumentar el Filler al máximo dentro la franja (Curva 1, 15% Filler), la estabilidad disminuye 4%, la fluencia aumenta 28%, la densidad disminuye 2%, y el contenido óptimo de cemento asfáltico crece un 64%.

En el caso de las curvas propuestas fuera de los límites se comportan de la misma forma que las curvas límite de la franja TM-40c, por tanto en caso de que se necesitara salir de las especificaciones, debe imitarse la forma de los límites de la franja mencionada.

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

En el presente proyecto de investigación se pudo evaluar la incidencia que tienen las diferentes granulometrías propuestas, en propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas, a través de los resultados de los diferentes ensayos que realizaron.

En la obtención del contenido óptimo de cemento asfáltico, se puede apreciar valores desde 3.79% hasta 8.55% con respecto al total de la masa de la mezcla, el valor mínimo sucedió cuando el contenido de filler o polvo era 0, mientras que el valor máximo fue cuando el polvo estaba en el más alto, lo que estima expone que a medida que el contenido de polvo se aumente el cemento asfáltico también requerirá amplificarse.

En la evaluación de estabilidad mediante el ensayo de Marshall, se obtuvieron resistencias a la deformación plástica desde 1103 lb hasta 2178 lb, en las curvas 11 y 10, ambas combinaciones se encuentran fuera de los requerimientos de la Norma Boliviana, pero aun así cumplen condiciones de estabilidad, también cabe mencionar que ambas curvas tiene una forma paralela a los límites establecidos, es decir en caso donde se requiera rebasar los límites de la norma por motivos de fuerza mayor (aunque no se recomiende excederlos), se podría lograr la resistencia solicitada, mientras se imite la forma de la curvatura de la banda perteneciente a la Norma.

La estabilidad máxima se presentó cuando la curva granulométrica se encontraba con el máximo porcentaje de agregado grueso, mientras que el fino constaba de su mínima expresión con relación a las demás curvas, en tanto al contrario la mínima estabilidad se dio cuando el porcentaje de finos era el más alto y el grueso el más bajo, lo que indica una clara relación de proporcionalidad de la resistencia a la deformación plástica con el contenido de agregado grueso.

En la evaluación de la deformación se obtuvo que el valor más alto se dio cuando el agregado fino estaba en sus números más bajos, y los valores más pequeños cuando el fino estaba tocando los picos de ponderación, lo que nos puede decir estos resultados es, que si se tiene una cantidad baja de finos producen más vacíos, lo que vulnera a la mezcla ante las deformaciones.

La densidad máxima entre las curvas propuestas sucedió cuando agregado grueso y el polvo eran los valores más altos, mientras que el fino estaba en su mínima expresión, y la mínima densidad se obtuvo al contraponer las ponderaciones del grueso, fino y polvo, lo que indica que a medida que se disminuya el material grueso y se aumente el fino la densidad de la mezcla decrecerá.

Los vacíos del agregado mineral bajan sus valores cuando las combinaciones granulométricas presentan mayor cantidad de material fino, y aumentan al decaer el fino, es decir es inversamente proporcional, siempre y cuando estas curvas sean continuas, que no presentes cortes o saltos bruscos en sus tamaños de agregados.

Se puede ver que los saltos en tamaños de los agregados en las curvas 6 y 7 son bastantes bruscos, pero a pesar de esta condición la estabilidad cumple con los parámetros establecidos, la fluencia cumple con el mínimo pero no así con el máximo pero la diferencia entre lo obtenido y lo establecido es menos de un 0.5%.

En las curvas 8 y 9 estas discontinuidades son más ligeras, menos notables, en estos casos la estabilidad y el flujo no se vio afectado, pues ambas propiedades presentaron valores dentro de los rangos requeridos, es más la curva 9 al estar casi en toda su distribución dentro de los límites Marshall, se adoptó como modelo de referencia para medir los aumentos y disminuciones de características como la densidad, estabilidad y fluencia.

La variación de la granulometría de los agregados pétreo incide de forma directa en la características físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas, si se aumenta agregado grueso se acrecentara la estabilidad y la fluencia disminuirá, si se tiene

mayor proporción de polvo se requerirá mayor cantidad de cemento asfáltico, y así de forma inversa también.

De acuerdo a las especificaciones que se busquen puede adecuarse las mezclas, pues las proporciones definirán la densidad, vacíos, estabilidad y fluencia de las mezclas asfálticas.

La curva ideal de acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación es cuando presenta una proporción de agregados de 45% grueso, 50% fino y 5% polvo, pues cumplen con todas las especificaciones establecidos en la norma.

También es importante mencionar que para que las mezclas asfálticas obtengan valores admisibles, el agregado pétreo y el cemento asfáltico debe cumplir con las solicitudes técnicas requeridas.

RECOMENDACIONES

- Utilizar los equipos para realizar la caracterización del cemento asfáltico y de los agregados pétreos con mucho cuidado debido al costo de cada uno de estos.
- Usar el equipo necesario de seguridad: guantes de cuero o lona, gafas de seguridad, ropa adecuada de preferencia un overol y mascarillas (tipo barbijo) para evitar la inhalación de gases tóxicos; para el manipuleo de las mezclas asfálticas, que se trabajan con temperaturas por encima de los 130° C,
- Controlar la temperatura de la forma más estricta posible en el momento previo al rompimiento de las probetas, debido a la sensibilidad térmica que tiene el asfalto.
- Hacer el mantenimiento correspondiente a la prensa Marshall, calibrar cuando corresponda, pues la des calibración de su anillo provoca variaciones bastante visibles en los valores de estabilidad de las probetas de mezcla asfáltica.
- Tener mucho cuidado cuando se están manipulando fuego y solventes, pues las mezclas asfálticas se trabajan con temperaturas altas, lo que impone tener

fuentes de calor cercanas, como cocinas, pero para el lavado de los instrumentos, se requieren solventes que son inflamables.

- Aplicar agua o hielo en caso de quemadura con asfalto, inmediatamente, no remover el asfalto de la piel y tampoco cubrir con una venda, recurrir inmediatamente a un médico.