

**CAPITULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

# **CORRELACIÓN DE LA TEXTURA SUPERFICIAL DE LOS PAVIMENTOS CON LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS APLICADO AL TRAMO TARIJA-EL VALLE**

## **1 INTRODUCCIÓN**

El agregado mineral juega un papel muy importante en el desempeño de las mezclas asfálticas, se ha encontrado que las características que más influyen en dicho desempeño y en particular al acabado, es decir, la textura, son principalmente la granulometría, tamaño máximo, angularidad del agregado grueso (caras fracturadas), angularidad del agregado fino (vacíos sin compactar), porcentaje de finos y la fuente del origen de los agregados.

La graduación de los agregados es un factor importante que influye en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, como así también en el acabado superficial de las mezclas asfálticas en caliente.

En la actualidad existe evidencia que muestra que mezclas con granulometrías de graduaciones densas son deseables para mitigar los efectos de la deformación permanente, y darle mayor textura a la superficie de la calzada.

En esta investigación se presenta una investigación sobre la correlación de la textura superficial del pavimento con las características mecánicas de la mezcla asfáltica, utilizando un diseño experimental que involucra tres factores (contenido de asfalto, granulometría y origen del agregado). Se analizan las propiedades superficiales (textura) y las características mecánicas del diseño de la mezcla asfáltica establecida a partir de los ensayos en laboratorio. Y la comparación con la textura y propiedades mecánicas de la capa de rodadura del tramo Tarija-El Valle de Concepción.

Para el diseño de estas mezclas asfálticas experimentales se aplica la Metodología de Marshall (A0613. Manuales Técnicos “Volumen 4: Ensayos de Suelos y Materiales”), obteniendo así el diseño de la mezcla, se procede a establecer mediante ensayos las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica diseñada a su vez que se realiza la medición de la macro-textura mediante el método volumétrico del círculo de arena (ASTM E 965-96).

## **1.1 DISEÑO TEÓRICO**

### **1.1.1 Justificación**

La textura o acabado superficial de una carretera es la que proporciona aparte de su diseño estructural, la comodidad y seguridad al momento de conducción sobre las mismas.

Macro-textura: Corresponde a los intersticios generados debido al tipo, procedencia y la distribución de agregado en la superficie. A la vez que estos mismos agregados son los que les proporcionan en gran parte a las características mecánicas de la mezcla de diseño para la aplicación en la capa de rodadura de una carretera.

El presente estudio pretende correlacionar la textura superficial con las características mecánicas de la mezcla de diseño, a partir de variaciones de la granulometría. Para proporcionar gráficas (Textura vs Densidad; Textura vs Estabilidad; Textura vs Fluencia) con las que podamos verificar de manera no destructiva las propiedades mecánicas que tiene la capa de rodadura en cuestión.

### **1.1.2 Planteamiento Del Problema**

No hay ninguna metodología no destructiva para verificar las propiedades de las mezclas asfálticas; densidad, estabilidad y fluencia, después del pavimentado.

¿Será a través de la textura superficial podemos encontrar alguna metodología viable para relacionarlo con las propiedades de las mezclas?

## **1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.2.1 Objetivo General**

Realizar una investigación para correlacionar la textura superficial de un pavimento con sus características mecánicas, para poder verificar de manera no destructiva dichas características, mediante la elaboración de una mezcla asfáltica en laboratorio.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Establecer la gradación de la muestra de material, bajo las especificaciones de diseño Marshall.

- Estudiar las características de los agregados pétreos a utilizar en el diseño de la mezcla asfáltica en caliente.
- Realizar los ensayos correspondientes para el cemento asfáltico se emplea en esta investigación, que es del tipo 85-100 (de procedencia brasilera).
- Aplicar la metodología Marshall para el diseño de la mezcla asfáltica, con la que se determina el contenido óptimo de cemento asfáltico, Y con la que se basa para la presente investigación.
- A partir del diseño establecido de la mezcla asfáltica se procede a realizar un lote briquetas basadas fielmente a la mezcla asfáltica obtenida a partir del diseño previo.
- Realizar los ensayos de medición de la macro-textura, en las briquetas realizadas a partir del diseño, como así también de la carretera en cuestión bajo la norma correspondiente (ASTM D 965)
- Realizar los ensayos correspondientes para encontrar las características mecánicas de las briquetas fabricadas bajo en diseño establecido.
- Hacer un análisis de los resultados obtenidos a partir de las mediciones a realizar de los diferentes ensayos de laboratorio.
- Correlacionar el diámetro del círculo de arena (textura superficial de pavimentos asfálticos) con sus propiedades mecánicas.
- Establecer conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.

### **1.2.3 Hipótesis**

Las características mecánicas de una mezcla asfáltica son definidas por el tipo y cantidad de agregado pétreo (tamaño máximo de la partícula, gradación general) y de asfalto que se emplea en la fabricación de la mezcla, como así también el procedimiento de ejecución durante la fabricación, colocación y compactado. A su vez, también le proporcionaran de cierta característica superficial (acabado-textura).

Debido a estas condicionantes de una mezcla, es decir, condicionantes de caracterización se pretende realizar la correlación de la textura superficial de un pavimento con las características mecánicas de la mezcla de la que está fabricado dicho pavimento.

### **1.3 ALCANCE**

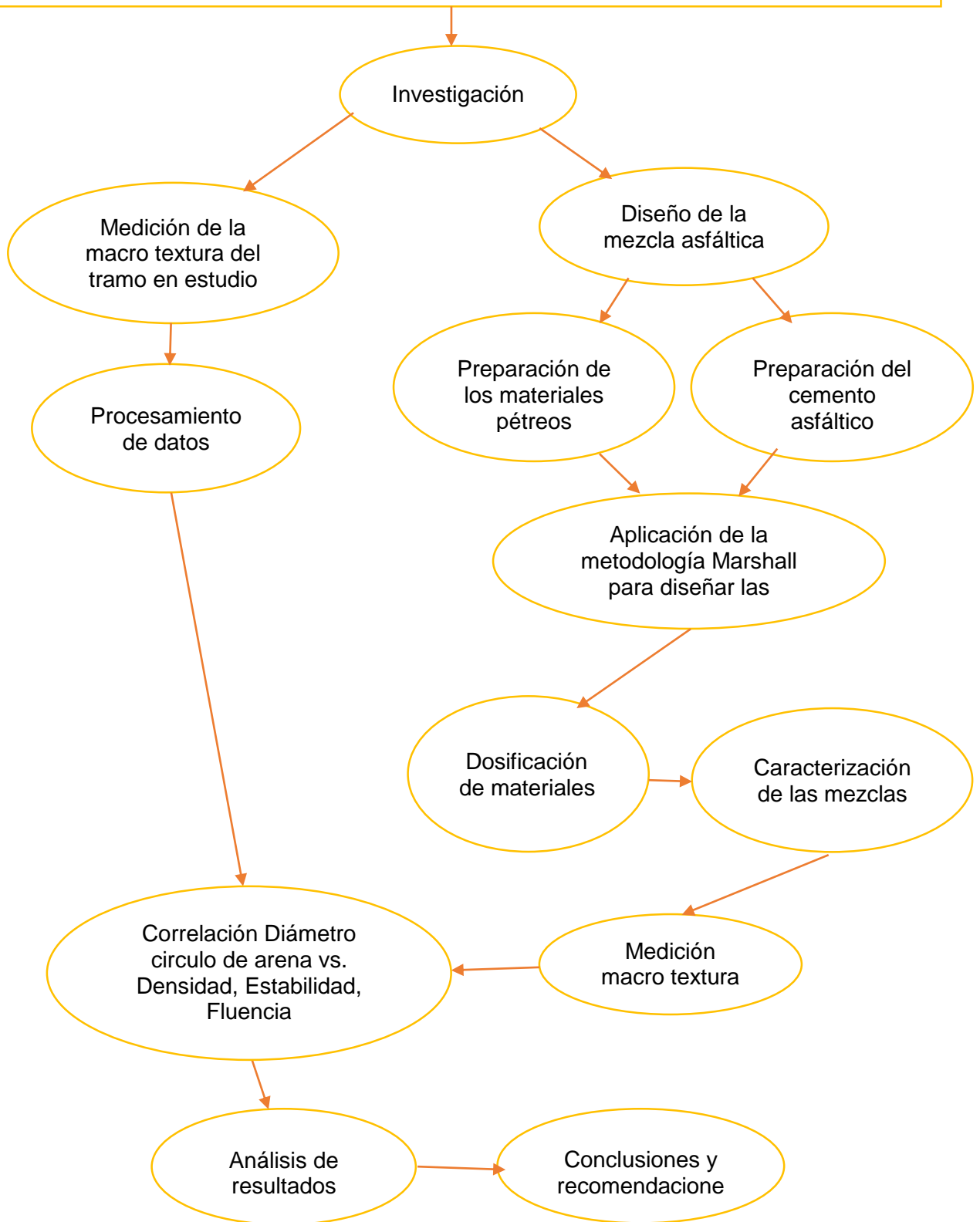
En este proyecto lo que se busca es obtener una correlación del Diámetro del Círculo de Arena (textura superficial de los pavimentos asfálticos) con sus propiedades mecánicas, a partir del diseño de una mezcla asfáltica de procedencia chancado (San José de Charaja) y tipo de gradación de la misma, a partir del diseño de esta mezcla asfáltica se elaboran briquetas, las cuales se someten a las pruebas correspondientes para determinar sus características mecánicas y de su textura superficial.

Con la ayuda de la estadística y el programa computacional Statgraphics se generan graficas de correlación, como así también de sus respectivas ecuaciones correlacionales.

### **1.4 PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS Y EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

Para la investigación de este trabajo se procederá a realizar un análisis de datos aplicando la estadística descriptiva para cada variable, cuya la primera tarea es describir los datos, valores o puntuaciones obtenidas para cada variable involucrada en esta investigación con el fin de concluir de manera satisfactoria.

**“CORRELACIÓN DE LA TEXTURA SUPERFICIAL DE LOS PAVIMENTOS CON LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS APLICADO AL TRAMO TARIJA-EL VALLE”**



**CAPITULO II**  
**MARCO TEORICO**

## **2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 AGREGADO PÉTREO**

En el diseño de una mezcla asfáltica en caliente intervienen dos materiales indispensables que son los agregados pétreos y el asfalto que para nuestro caso se usara asfalto de tipo 85-100; los agregados por su parte son de gran importancia ya que en una mezcla asfáltica constituyen entre el 90 y el 95 por ciento en peso, y entre el 75 y 85 por ciento en volumen; es de mencionar que la calidad de la mezcla asfáltica depende de la calidad de los materiales constituyentes y la capacidad de carga de la carpeta es proporcionada esencialmente por los agregados, de esto se deriva la importancia de una adecuada selección y manejo de los materiales pétreos que serán utilizados para elaborar una mezcla asfáltica, específicamente en lo que se refiere a una buena distribución granulométrica. Una pequeña variación en el porcentaje de un determinado tamaño de agregado o en las propiedades de éste puede causar cambios significativos en las propiedades de la mezcla elaborada por lo tanto es necesario llevar un control eficiente de los agregados:

- a) Control de calidad del agregado que se produce en la planta trituradora.
- b) Acopio de agregados.
- c) Alimentación en frío de agregados.

El control de la calidad del agregado usado es un factor crítico en el comportamiento de una carpeta de concreto asfáltico, sin embargo, además de la calidad se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación, estos criterios incluyen el costo, la disponibilidad del agregado su origen y además, deberá cumplir con ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para concreto asfáltico de buena calidad.

#### **2.1.1 Agregado**

Los agregados pétreos son materiales granulares sólidos inertes, usados para ser mezclado en diferentes tamaños de partículas graduadas, como parte de una mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen la arena, la grava, la escoria de alto horno, o la roca triturada y polvo de roca. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influido por la selección

apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad soportante.

#### **2.1.1.1 Clasificación de agregados**

Los agregados usados en pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. Estos incluyen: agregados naturales, agregados procesados, y agregados sintéticos o artificiales.

##### **- Agregados Naturales**

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

Las gravas y las arenas son clasificadas, además, de acuerdo a su origen. Los materiales producidos en canteras abiertas y usados sin ningún procesamiento adicional son conocidos como materiales en bruto, y los materiales tomados de la ribera de los ríos son conocidos como materiales de canteras de ríos.

Los depósitos de gravas varían ampliamente en composición, pero usualmente contienen alguna cantidad de arena y limo. Los depósitos de arena también contienen, comúnmente, alguna cantidad de arcilla y limo. Las arenas de playa (algunas de las cuales se encuentran tierra adentro hoy día) están compuestas de partículas de tamaño regularmente uniforme, mientras que las arenas de río contienen proporciones grandes de grava, limo y arcilla.

##### **- Agregados procesados**

Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimento de mezcla asfáltica, y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que son extraídas de canteras y que deben ser reducidas en tamaño en las plantas trituradoras, antes de ser usados en la pavimentación; de la calidad

de las rocas que se explotan en las canteras dependerá la calidad de los agregados procesados y dispuestos para ser utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

La roca es triturada por tres razones:

1. Para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa,
2. Para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular, y
3. Para reducir y mejorar la distribución y el rango (graduación) de los tamaños de las partículas.

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

El tamizado de los materiales, después de triturarlos, resulta en una granulometría con cierto rango de tamaño de partícula. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad consiste en mantener graduaciones específicas de agregados. Sin embargo, por razones económicas, el material triturado es usado tal y como sale del triturador, con muy poco o ningún tamizado. Un control adecuado de las operaciones de triturado determina si la graduación resultante del agregado cumple, o no, con los requisitos de la obra. El agregado triturado, sin tamizar, es conocido como agregado triturado sin cribar, y es usado satisfactoriamente en muchos proyectos de construcción de pavimento. Sin embargo, es esencial garantizar que la operación de triturado sea continuamente supervisada para poder producir un agregado que cumpla con las especificaciones.

El triturado de algunos tipos de roca, como las calizas, produce cantidades substanciales de pequeños fragmentos y partículas. Esta fracción de material es separada de las partículas que tienen diámetros iguales o mayores 6.35 mm (1/4 pulgada), casi siempre, y usada como agregado de arena triturada, o procesada hasta tamaños máximos de 0.60 mm (No. 30).

## **2.1.2 Acopio Y Manejo De Agregados**

### **2.1.2.1 Generalidades**

Los procedimientos para manejar y acopiar las reservas de agregado varían de obra en obra, debido a que la mayoría de los contratantes no tienen claras las especificaciones para dichos procedimientos. En vez de ello el dueño del proyecto requiere, usualmente, que el contratista cumpla con las especificaciones de graduación para el agregado. Estas especificaciones tendrán que ser cumplidas ya sea durante la elaboración o acopio de reservas del agregado, o cuando la mezcla de pavimentación sea producida y colocada. En cualquier caso, el constructor deberá estar al tanto de cómo las prácticas de manejo y acopio de reservas tanto buenas y malas afectan la selección del agregado.

El muestreo y los ensayos son los únicos medios para verificar si las especificaciones están siendo cumplidas, aún si estas requieren que el agregado cumpla con graduaciones durante la fabricación, acopio de reservas o producción de mezcla. Para garantizar que las muestras seleccionadas sean representativas, se deben seguir ciertos procedimientos de muestreo, indicados en el Ensayo “Muestreo de Agregados” AASHTO T 2-91 (2000) y su equivalente ASTM D 75-87 (1992).

#### **2.1.2.2 Acopio de agregado**

Para producir mezclas asfálticas en caliente de alta calidad es esencial tener buenos procedimientos de acopio de reservas. Los agregados retienen su graduación si son adecuadamente acopiados. Cuando el acopio es malo, las partículas de agregado se segregan (separan por tamaño), y la graduación varía en los diferentes niveles del acopio. El Ingeniero deberá estar al tanto de los efectos producidos, en la graduación del agregado, por las diferentes prácticas de acopio, y siempre deberá fomentar las buenas prácticas.

El ingeniero deberá estar preparado para recibir los agregados antes de que éstos sean entregados en la planta. Deberán prepararse superficies firmes y limpias, y deberán tomarse precauciones para mantener separadas las reservas y así prevenir entremezclado de partículas, el cual conduce, frecuentemente, a errores en la graduación. La separación se logra ya sea manteniendo las reservas ampliamente espaciadas, mediante el uso de muros de contención entre ellas, o almacenando el agregado en depósitos.

El uso de muros de contención requiere que éstos sean lo suficiente fuertes para resistir el peso del agregado, y que se extiendan hasta la profundidad total de las reservas.

### 2.1.2.3 Manejo de agregado

El manejo de agregado es muy importante ya que las partículas individuales de agregado causan segregación cuando se trata de partículas que presentan diferentes tamaños, por lo tanto, el manejo de agregado debe ser mínimo para poder prevenir cualquier degradación y segregación.

El manejo mínimo incluye apartar el agregado de las reservas para que pueda ser procesado adicionalmente, y para luego ser mezclado en la planta de mezcla en caliente. No existen reglas específicas para esta operación, pero sí hay una norma general que casi siempre se aplica; ésta consiste en usar un cargador para remover material de las partes casi verticales del acopio. Si se usa un buldózer, o cualquier otro vehículo de tracción, para trabajar en la parte superior del acopio, aumenta la probabilidad de una alta degradación.

Si se permite el uso de topadoras en el manejo de pilas de agregado, éstas no deberán trabajar continuamente sobre el mismo nivel. Si esto llegara a ocurrir, el material fino, producido por la acción moledora de la banda de rodamiento, encontrará el camino hacia la parte baja de la rampa que está siendo usada por la topadora. Por lo tanto, el material tendrá que volver a ser tamizado antes de ser usado en la mezcla. De otra manera, el material deberá ser desechado. Este problema no está únicamente limitado al uso de topadoras y otros vehículos de tracción; también ocurre cuando se usan equipos con llantas de caucho.

Figura 1. Segregación Causada Por El Buldócer



Fuente: Fotografía propia

Para garantizar que la pila mantenga una graduación uniforme se deben tomar muestras del agregado, y ensayarlas con frecuencia. Cada muestra de la pila debe ser un compuesto de agregados tomados de diferentes niveles de la pila - cerca a la cima, en la mitad, y cerca de la base. Es posible usar un escudo de madera o metal metido verticalmente en la pila, justo

por encima del área de muestreo, para prevenir que partículas sueltas de agregado se derrumben sobre la muestra durante la operación de muestreo.

Para obtener muestras, use una pala de punta cuadrada con bordes doblados hacia arriba tal que formen una cuchara. Introduzca horizontalmente la cuchilla de la pala dentro de la pila y remueva una palada de material. Tenga cuidado de no dejar caer ninguna de las partículas. Luego coloque el agregado en un balde. Las paladas siguientes serán colocadas en el mismo balde.

### **2.1.3 Propiedades De Los Agregados Utilizados En M.A.C.**

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

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

- ❖ Graduación y tamaño máximo de partícula.
- ❖ Limpieza.
- ❖ Dureza.
- ❖ Forma de la partícula.
- ❖ Textura de la superficie.
- ❖ Capacidad de absorción.
- ❖ Afinidad con el asfalto.
- ❖ Peso específico.

Cada una de las propiedades mencionadas se describe a continuación.

#### **2.1.3.1 Graduación y tamaño máximo de la partícula**

##### **Graduación**

Todas las especificaciones de pavimento asfáltico de mezcla en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertas proporciones. Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla. Es necesario entender cómo se mide el tamaño de partículas y la graduación para determinar si la graduación del agregado cumple o no con las especificaciones.

- **Tamaño máximo de la partícula**

El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado usado. Existen dos formas de designar tamaños máximos de partículas:

a) **Tamaño máximo nominal del agregado**

Designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices.

b) **Tamaño máximo del agregado**

Designado como el tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula. Típicamente, éste es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100 % de las partículas de agregado.

### **2.1.3.2 Limpieza**

Las especificaciones de la obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etc.) en el agregado. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento.

La limpieza del agregado puede determinarse, usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado de acuerdo a la norma AASHTO T 11-97 (2000) y su equivalente ASTM 117-95 (donde el peso de la muestra de agregado antes de ser lavada es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075 mm (No. 200). El Ensayo “Finos Plásticos en Agregados Graduados y Suelos por el Uso del Ensayo del Equivalente de Arena” (AASHTO

T 176-02) es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4).

### **2.1.3.3 Textura superficial**

La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no sólo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento. Algunos consideran que la textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, como la del papel de lija, aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro.

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

### **2.1.3.4 Capacidad de absorción**

Normas: (Agregado grueso: AASHTO T 85-91 y ASTM C 127-88 (1993). Agregado fino: AASHTO T 84-00 y ASTM C 128-97).

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

La capacidad de un agregado de absorber agua (o asfalto) es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en la planta, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado. Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades muchos mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso.

Los agregados altamente porosos y absorbentes no son normalmente usados, a menos de que posean otras características que los hagan deseables, a pesar de su alta capacidad de

absorción. Algunos ejemplos de dichos materiales son la escoria de alto horno y ciertos agregados sintéticos.

Estos materiales son altamente porosos, pero también son livianos en peso y poseen alta resistencia al desgaste.

#### **2.1.3.5 Afinidad con el asfalto**

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto. Las calizas, las dolomitas, y las rocas trapecanas tienen alta afinidad con el asfalto y son conocidas como hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies.

Los agregados hidrofílicos (atraen el agua) tienen poca afinidad con el asfalto. Por consiguiente, tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestos al agua. Los agregados silíceos (cuarcita y algunos granitos) son ejemplos de agregados susceptibles al desprendimiento y deben ser usados con precaución.

No es muy claro por qué los agregados hidrofóbicos e hidrofílicos se comportan de tal manera. A pesar de esto, existen varios ensayos para determinar su afinidad con el asfalto y su tendencia al desprendimiento. En uno de estos ensayos, la mezcla de agregado-asfalto, sin compactar, es sumergida en agua, y las partículas cubiertas son observadas visualmente.

En otro ensayo, comúnmente conocido como ensayo de inmersión-compresión, dos muestras de mezcla son preparadas y una es sumergida en agua. Posteriormente, ambas son ensayadas para determinar sus resistencias. La diferencia en resistencia es considerada un indicativo de la susceptibilidad del agregado al desprendimiento.

#### **2.1.4 Importancia De Una Buena Granulometría Del Agregado**

La granulometría del agregado, o graduación de la mezcla, tiene en cuenta el porcentaje (en peso) total de muestra que pasa por cada uno de los tamices. La granulometría es determinada al calcular el peso del contenido de cada tamiz, después de haber efectuado el análisis de tamices. Luego se resta el peso del contenido de cada tamiz del peso total de la muestra.

Figura 2. Análisis Granulométrico



Fuente: Fotografía propia (laboratorio de suelos UAJMS)

Los concretos asfálticos son clasificados de acuerdo a los porcentajes de partículas de agregado que contienen. El Cuadro 3 ilustra cinco tipos diferentes de concreto asfáltico y sus contenidos respectivos de agregado.

Cuadro 1. Composición Típica Del Concreto Asfáltico

Tamaño de Tamiz	Designación de la Mezcla Usando el Tamaño Máximo Nominal de Agregado				
	37,5 mm (1 1/2 in)	25,0 mm (1 in)	19,0 mm (3/4 in)	12,5 mm (1/2 in)	9,5 mm (3/8 in)
	Porcentaje total que pasa (en peso)				
50 mm (2 in)	100	-	-	-	-
37,5 mm (1 1/2 in)	90 a 100	100	-	-	-
25,0 mm (1 in)	-	90 a 100	100	-	-
19,0 mm (3/4 in)	56 a 80	-	90 a 100	100	-
12,5 mm (1/2 in)	-	56 a 80	-	90 a 100	100
9,5 mm (3/8 in)	-	-	56 a 80	-	90 a 100
4,75 mm (Nro. 4)	23 a 53	29 a 59	35 a 65	44 a 74	55 a 85
2,36 mm (Nro. 8)	15 a 41	19 a 45	23 a 49	28 a 58	32 a 67
1,18 mm (Nro. 16)	-	-	-	-	-
0,60 mm (Nro. 30)	-	-	-	-	-
0,30 mm (Nro. 50)	4 a 16	5 a 17	5 a 19	5 a 21	7 a 23
0,15 mm (Nro. 100)	-	-	-	-	-
0,075 mm (Nro. 200)	0 a 5	1 a 7	2 a 8	2 a 10	2 a 10
Cemento Asfáltico, porcentaje en peso del total de la mezcla*	3 a 8	3 a 9	4 a 10	4 a 11	5 a 12

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente del Asphalt Institute Serie de Manuales N° 22 (MS-22)

'Cuando se consideran las características de la graduación total de una mezcla asfáltica, resulta ser que la cantidad de material que pasa el tamiz de 2.36 mm (No. 8) es un punto importante y conveniente de control de campo entre los agregados finos y los agregados gruesos. Las graduaciones que se aproximan a la cantidad máxima permitida que debe pasar por el tamiz de 2.36 mm resultaran en superficies de pavimento con textura relativamente fina.

Las graduaciones que se aproximan al valor mínimo permitido resultaran en superficies con textura relativamente áspera.

"El material que pasa el tamiz de 0.075 mm (No. 200) puede consistir de partículas finas de agregado o de relleno mineral, o de ambos. Este material deberá estar libre de materia orgánica y de partículas de arcilla, y deberá tener un índice de plasticidad no mayor a 4 cuando se usa el Método D 423 o D 424 de la ASTM.

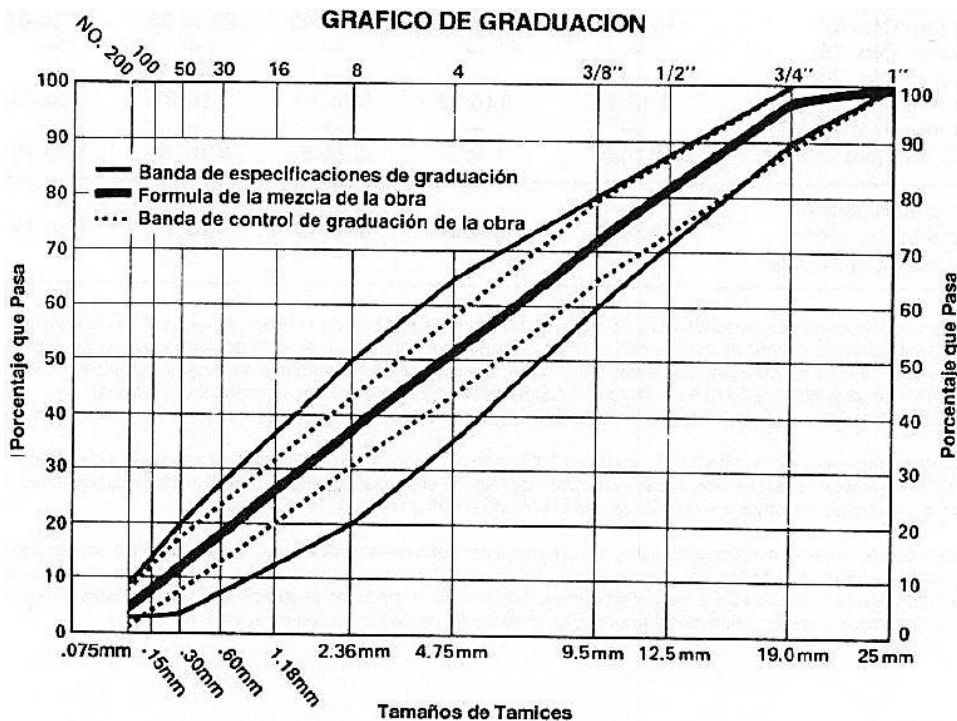
\*La cantidad de cemento asfáltico esta dada en porcentaje por peso de la mezcla total. La amplia diferencia en pesos específicos de varios agregados, así como la diferencia en absorción, resulta en el amplio margen de cantidad de asfalto requerida. Esta cantidad de asfalto requerida deberá determinarse usando las pruebas adecuadas de laboratorio, o con base en la experiencia previa con mezclas similares, o mediante una combinación de ambos métodos.

Las especificaciones de granulometría de agregado para una obra dada pueden ser presentadas gráficamente. La Figura 4 muestra un gráfico típico de granulometría. En el gráfico, los tamaños de los tamices se muestran horizontalmente tanto en unidades métricas como en unidades habituales.

El porcentaje de material que pasa se muestra verticalmente. Las especificaciones para una obra dada están representadas por la región que está entre las líneas sólidas delgadas. La fórmula de la mezcla de pavimentación está representada por la línea sólida gruesa. La banda de control de granulometría para la obra - establecida como referencia para controlar la granulometría en la obra - está situada dentro de la región encerrada por las líneas punteadas.

Examinemos, usando la (Figura 3), que nos dice un gráfico de granulometría. Tomando el tamiz de 9.5 mm (3/8 pulgada) como ejemplo, podemos observar que la banda de control de graduación permite que pase, por este tamiz, el 65 a 80 por ciento de agregado. La fórmula de la mezcla de la obra requiere que el 72 por ciento de agregado pase a través del tamiz de 9.5 mm (3/8 pulgada). Sin embargo, el margen usado durante el mezclado y la construcción está entre el 65 y el 80 por ciento (material pasando el tamiz). Un gráfico de granulometría permite que el inspector comprenda, rápida y fácilmente, las graduaciones requeridas por la banda de especificaciones, por la fórmula de mezcla de la obra, y por la banda de control de graduación de la obra.

Figura 3. Granulometría Exponencial (Y Ejemplo De Una Banda De Granulometría)



**Fuente:** Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente del Asphalt Institute Serie de Manuales N° 22 (MS-22)

En la norma ASTM E 11-95 se encuentran los tamices para laboratorio para análisis granulométrico en general. En el cuadro siguiente se muestran los tamaños y números de tamices más frecuentemente usados en la graduación de agregado para mezclas asfálticas de pavimentación.

Cuadro 2. Tamaños Típicos De Tamices

Designación de Tamices Para agregados Gruesos		Designación de Tamices para Agregados Gruesos	
Sistema Métrico	Sistema Habitual Norteamericano	Sistema Métrico	Sistema Habitual Norteamericano
63 mm	2 1/2 in	4,75 mm	Nro. 4
50 mm	2 in	2,36 mm	Nro. 8
37,5 mm	1 1/2 in	1,18 mm	Nro. 16
25,0 mm	1 in	0,60 mm	Nro. 30
19,0 mm	3/4 in	0,30 mm	Nro. 50
12,5 mm	1/2 in	0,15 mm	Nro. 100
9,5 mm	3/8 in	0,075 mm	Nro. 200

**Fuente:** Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente del Asphalt Institute Serie de Manuales N° 22 (MS-22)

### 2.1.5 Requisitos Que Deben Cumplir Los Agregados

### **2.1.5.1 Agregado grueso**

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

- (1) Abrasión de los Ángeles, AASHTO T 96 40% máx.
- (2) Sanidad en sulfato de sodio (5 ciclos), AASHTO T 104 12% máx.
- (3) Caras fracturadas, ASTM D 5821 75% mín.
- (4) Índice durabilidad (agregado grueso), AASHTO T 210 35% mín.

No deben usarse agregados con caras pulidas o agregados que contengan carbonato soluble. El residuo insoluble debe ser menor del 25%, de acuerdo a ASTM D 3042.

### **2.1.5.2 Agregado fino**

Este material está formado por arenas naturales, arena de piedra quebrada cernida, o su combinación y deberá tener una granulometría que (material que pasa la malla 4.75 mm), al combinarse con otras fracciones en la proporción adecuada, la mezcla resultante puede satisfacer la granulometría requerida según AASHTO M 29 incluyendo la pérdida en sulfato, y que llene además los requisitos generales siguientes:

- (1) Equivalente de arena, AASHTO T 176 45% mín.
- (2) Índice de durabilidad (fino), AASHTO T 210 35% min

## **2.2 AGLOMERANTES ASFÁLTICOS**

### **2.2.1 Generalidades**

El Asfalto es un producto natural o compuesto que proviene de la destilación seca de productos orgánicos vegetales. Es una mezcla de Betún con productos materiales inertes tales como sílice, arena, arcilla, etc. El Asfalto se utiliza principalmente en la pavimentación de obras viales.

Como se explica en el Manual del Instituto del Asfalto, el asfalto es uno de los componentes ingenieriles más arcaico utilizado desde los inicios del hombre para la construcción. Fue en Egipto, aproximadamente en el año 2500 a.c. que el asfalto fue descubierto; es una palabra

cuyo vocablo que deriva del acadio “Sphalto” que significa “que deja caer”, este término se utilizaba en Asiria entre los años 1400 y 600 a.c., tiempo después esta palabra fue adoptada por los griegos, quienes le otorgaron el significado de “que rigidiza o estabiliza, y finalmente evolucionó al latín y después al francés (Asphalte) y al español (Asfalto), hasta llegar al inglés (Asphalt).

En el antiguo mundo el asfalto era utilizado como mortero para la pega de bloques en la construcción, en la realización de pavimentos interiores y como impermeabilizante en la industria naval y numerosas aplicaciones más. Como ejemplos históricos de ello se encuentran: la industria naval que producía y utilizaba el asfalto en Sumeria cerca de los 6000 a.c., el uso del asfalto como mortero en la construcción de las Torres de Babel y la utilización como material impermeable que le daban los egipcios al igual que como material de relleno del cuerpo humano en el proceso de momificación.

En aquel entonces, era común encontrar asfalto natural depositado en estanques y lagos de asfalto, así como en piedras porosas como la caliza y la arenisca (piedras conocidas también como “piedras asfálticas”). Ésto se explica debido a las fuerzas geológicas que provocaron el ascenso del asfalto a la superficie y al hacer contacto, con los elementos de la atmósfera provocaban su endurecimiento; ejemplo de ésto son los depósitos del lago de asfalto de Trinidad, el cual se encuentra en la isla del mismo nombre en la Costa Septentrional de Venezuela. Sin embargo, en la actualidad el asfalto que se utiliza es artificial y se deriva del petróleo.

El asfalto refinado comenzó a utilizarse hace casi doscientos años como sustituto del asfalto natural debido a que este último sólo se encontraba en lugares apartados y su reología no era tan buena, ya que su contenido malténico al calentarse se evaporaba con rapidez y se endurecía con mucha facilidad. Al mismo tiempo, la industria automotriz empezó a expandirse por lo que una nueva industria llegó para mejorar las condiciones de las carreteras proporcionándoles texturas más suaves y diseños más modernos, por lo que el asfalto comenzó a verse como un producto industrial barato e inagotable; fue así como se inició el uso del asfalto en la construcción de las carreteras.

A principios del siglo XIX, sus aplicaciones se enfocaron en el ámbito de las vías terrestres, por lo que fue en 1802 cuando se utilizaron por primera vez en Francia rocas asfálticas como

material para la construcción de banquetas, y en Filadelfia se utilizaron en 1838, pero la evolución del asfalto y su aplicación en las vías terrestres se dio en 1870 en Newark, New Jersey, cuando se construyó el primer pavimento de asfalto en el mundo.

### **2.2.2 Definición Del Asfalto**

La ASTM define al asfalto o cemento asfáltico como *“un cementante de color marrón oscuro a negro en el que sus componentes predominantes son los asfáltenos que pueden ser naturales u obtenidos como residuo en la refinación del petróleo crudo”*.

El asfalto posee características tanto químicas como físicas, que son los elementos que le proveen todas sus particularidades y hacen de éste el producto esencial que es hoy en la industria de la construcción. Este cementante contiene tres importantes propiedades químicas: consistencia, pureza y seguridad, donde la primera se debe a su habilidad para fluir a diferentes temperaturas, ésto en razón a que el asfalto es un material termoplástico, es decir, se fluidifica a altas temperaturas. La segunda define la composición química del asfalto, donde las impurezas de éste, son prácticamente inertes. La tercera precisa el comportamiento de afinidad química con las diferentes cargas eléctricas. De la misma manera, dentro de su composición química contiene características de aglutinación, debido a su constitución principalmente de asfáltenos y máltenos, que son los elementos que le proporcionan dichas particularidades; este último define la capacidad del asfalto para ser manejado a altas temperaturas con seguridad.

### **2.2.3 Clasificación Del Asfalto**

#### **2.2.3.1 Sistema de clasificación por penetración**

El método de penetración fue el primer sistema desarrollado para la clasificación de asfaltos y todavía es utilizado por diferentes agencias de carreteras. Dicho sistema fue desarrollado en 1918 por el Bureau of Public Works (ahora Federal Highway Administration, FHWA), y posteriormente en 1931, la AASHTO publicó las primeras especificaciones técnicas para la clasificación de asfaltos por penetración. Cabe señalar que la clasificación del asfalto por penetración, conlleva el desarrollo de una serie de ensayos de laboratorio, los cuales están contemplados en la norma ASTM D 946, Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction.

### **2.2.3.2 Sistema de clasificación por viscosidad**

El sistema de clasificación por viscosidad fue introducido a principios de la década de 1960, mediante el cual es posible clasificar cementos asfálticos en estado virgen y en residuos asfálticos. Dicho sistema de clasificación fue concebido debido a las limitantes que presenta el sistema de clasificación por penetración, una de las cuales está relacionada con la imposibilidad de evaluar la susceptibilidad térmica del asfalto o no poder evaluar el comportamiento del mismo a temperaturas normales de operación de la mezcla asfáltica. Los ensayos requeridos para la clasificación del asfalto, están contemplados en la norma ASTM D 3381, Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction. Dentro de esta especificación se encuentran los asfaltos clasificados por a) Viscosidad (AC) y b) Residuo asfáltico (AR), los cuales se detallan a continuación:

a) Viscosidad (AC). Los ensayos se realizan en el asfalto original (virgen), entre los asfaltos clasificados por viscosidad, tenemos los siguientes: AC 5, AC 10, AC 20, AC 30, AC 40. A continuación, en el cuadro, se presentan las características físicas que deben cumplir estos asfaltos:

b) Residuo (AR). Los asfaltos clasificados por residuo son más conocidos como asfaltos clasificados por viscosidad después de envejecido, entre los cuales se encuentran los siguientes: AR-10, AR-20, AR-40, AR-80 y AR-160. A continuación, en la cuadro 7, se presentan las características físicas que deben cumplir estos asfaltos:

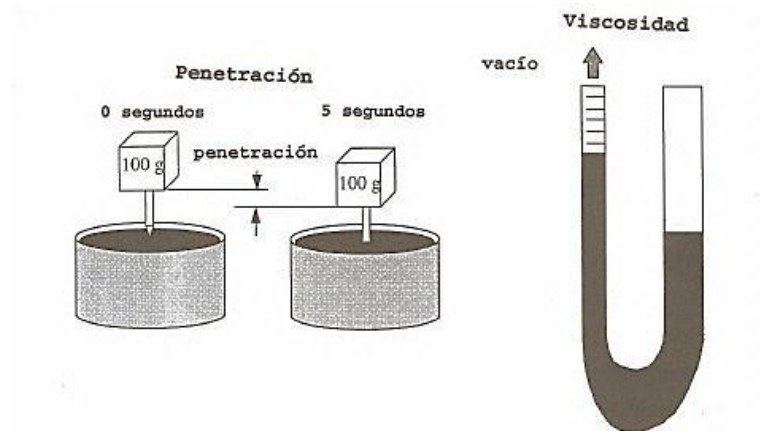
### **2.2.4 Propiedades De Los Asfaltos**

Actualmente, para caracterizar la consistencia de los asfaltos se utiliza el ensayo de penetración o el ensayo de viscosidad. Ambos ensayos han sido empleados para medir el efecto de la temperatura en el comportamiento de los asfaltos. Ello se hace determinando la viscosidad o la penetración a dos temperaturas diferentes y graficando los resultados.

Aquí, los tres asfaltos tienen el mismo grado de viscosidad, ya que están dentro de los límites especificados a 60<sup>0</sup> C. Aunque los asfaltos A y B muestran la misma dependencia a la temperatura, tiene una consistencia muy diferente a cualquier temperatura. A y C tienen la misma consistencia a temperaturas intermedias, pero tienen una consistencia significativamente distinta a altas y bajas temperaturas. El asfalto B tiene la misma

consistencia que el C a 60° C, pero no hay otra similitud entre ellos. Debido a que estos asfaltos tienen el mismo grado, podría esperarse erróneamente el mismo comportamiento durante la construcción y durante la vida útil, tanto en climas fríos como en cálidos.

Figura 4. Ensayos De Penetración Y Viscosidad

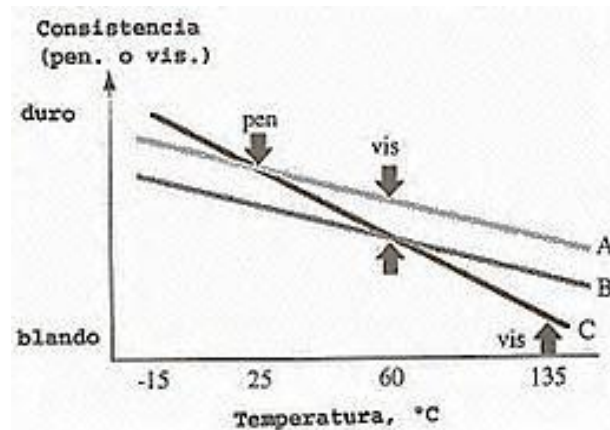


Fuente: Métodos de Ensayo de Ligantes Asfálticos

Si bien la viscosidad es un indicador fundamental del flujo, solo suministra información sobre el comportamiento viscoso a alta temperatura, y no sobre el comportamiento elástico a baja temperatura requerido para completar la predicción del comportamiento. La penetración describe solo la consistencia a temperatura media, 25° C. Las propiedades a baja temperatura no son directamente medidas con el sistema actual de clasificación. A menudo, los ensayos de viscosidad y penetración no señalan cabalmente las ventajas o posibles desventajas de algunos asfaltos modificados.

Debido a estas deficiencias, muchas agencias viales han corregido ensayos estándar y especificaciones para adaptarlos mejor a las condiciones locales. En algunas partes de los EEUU, esta proliferación de ensayos y especificaciones ha causado serios problemas a los proveedores, que desean vender el mismo grado de asfalto en distintos estados. A menudo, estados con similares condiciones de comportamiento y materiales especifican asfaltos considerablemente diferentes.

Figura 5. Susceptibilidad Térmica De Tres Asfaltos



Fuente: Antecedentes de los Métodos de Ensayo de Ligantes Asfálticos

En el sistema actual de caracterización de los asfaltos, los ensayos son realizados en muestras del asfalto sin envejecer o sobre muestras artificialmente envejecidas para simular el envejecimiento durante la etapa constructiva. Sin embargo, no se realizan ensayos en asfaltos que hayan sido envejecidos para simular el envejecimiento durante el tiempo de servicio.

### 2.3 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas, es material que está formada por una combinación de agregados pétreos, ligante asfáltico, y aditivo en algunos casos; de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de éste.

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

Existen tres métodos de diseño utilizados para determinar las proporciones adecuadas de asfalto y agregados. Ellos son el Método Marshall y el Método Hveem, actualmente el método que se utiliza en EEUU es el método SUPERPAVE ya que se considera que la metodología de diseño está basada en pruebas más reales y científicas y no empíricas como las del método Marshall; debido a las condiciones económicas los países como el nuestro se sigue utilizando es el método Marshall.

### 2.3.1 Clasificación De Las Mezclas Asfálticas

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

#### a) Por Fracciones de agregado pétreo empleado.

- Masilla asfáltica: Polvo mineral más cemento asfáltico.
- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto asfáltico: Agregado grueso, agregado fino, polvo mineral y cemento asfáltico.
- Macadam asfáltico: Capa de rodadura formada por una sucesión de capas de mezcla asfáltica con materiales pétreos de diferentes granulometrías, colocando las de mayor granulometría abajo, y arriba la de menor granulometría. Luego se procede a la compactación con rodos y camiones.

#### b) Por la Temperatura de puesta en obra.

- Mezclas asfálticas en Caliente: El concreto asfáltico mezclado en planta y compactado en caliente, se compone de una mezcla de agregados graduados y asfalto, fabricado a una temperatura aproximada de 150°C colocada y compactada en caliente a una temperatura de 140 °C. Las plantas para la producción de mezclas en caliente se construyen de tal manera que, después de secar y calentar los agregados, los separa en diferentes grupos de tamaños, los recombina en las proporciones adecuadas, los mezcla con la cantidad debida de asfalto caliente y finalmente los entrega a los vehículos transportadores, que a su vez la colocan en la máquina pavimentadora para que ésta la deposite sobre la vía con un espesor uniforme, después se compacta mediante rodillos mientras la temperatura se conserva dentro de los rangos de especificación. .
- Mezclas asfálticas en frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.
- Mezclas asfálticas tibias: Las mezclas tibias se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 100°C y 135°C , su producción involucra nuevas tecnologías a partir de los

cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales. El concepto de mezcla tibia surgió en Europa, tras la necesidad de una mezcla bituminosa que ofreciera economía de energía y tuviera el mismo desempeño de las mezclas asfálticas en caliente.

**c) Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica.**

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas, como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas Cerradas o Densas: contienen cantidades de agregados en proporciones adecuadas de todos los tamaños, de grueso a fino, incluyendo filler, proporcionados de tal forma de obtener una mezcla densa con pocos vacíos. La proporción de vacíos no supera el 5 %. Las mezclas densamente graduadas tienen un gran número de puntos de contacto entre las partículas, que pueden dar una alta resistencia friccional y reducir la posibilidad de trituración de las partículas en los puntos de contacto. Como el contenido de vacíos es bajo, son poco permeables. En las mezclas asfálticas en caliente, deben preferirse agregados con granulometría densa, o muy cercana a la densa.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 5 % y el 10%.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenantes: Mezclas asfálticas utilizadas como carpeta de rodadura, que se caracteriza por tener un elevado porcentaje de huecos interconectados entre sí, permitiendo el paso del agua a través de la mezcla y su rápida evacuación hacia las zonas laterales fuera de las calzadas. La proporción de vacíos es superior al 20 %.

**d) Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.**

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

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

**e) Por la Estructura del agregado pétreo.**

- Mezclas con Esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.
- Mezclas sin Esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

**f) Por la Granulometría.**

- Mezclas Continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico (Zona comprendida entre dos curvas granulométricas).
- Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

### **2.3.2 Características De La Mezcla**

La mezcla asfáltica en caliente preparada en laboratorio debe ser analizada para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento. Determinando así, características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla. Las cuales se detallan a continuación:

- ❖ Densidad
- ❖ Vacíos de aire
- ❖ Vacíos en el agregado mineral

## ❖ Vacíos llenos de asfalto

### 2.3.2.1 Densidad

Está definida como su peso unitario, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. La densidad es una característica importante para obtener un rendimiento duradero. Si la densidad es baja la cantidad de vacíos son mayores, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua. Si la densidad es alta, la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrara en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura más durable. La densidad de la muestra compactada se expresa en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ) o libras por pie cúbico ( $\text{lb/pe}^3$ ), es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ( $1,000 \text{ kg/m}^3$  o  $62.416 \text{ lb/pe}^3$ ). La densidad patrón obtenida en laboratorio se utiliza como referencia para determinar el grado de compactación del pavimento compactado en la obra es adecuada o no. Difícilmente en la compactación in-situ se obtiene la densidad patrón, por lo tanto las especificaciones permiten un porcentaje aceptable.

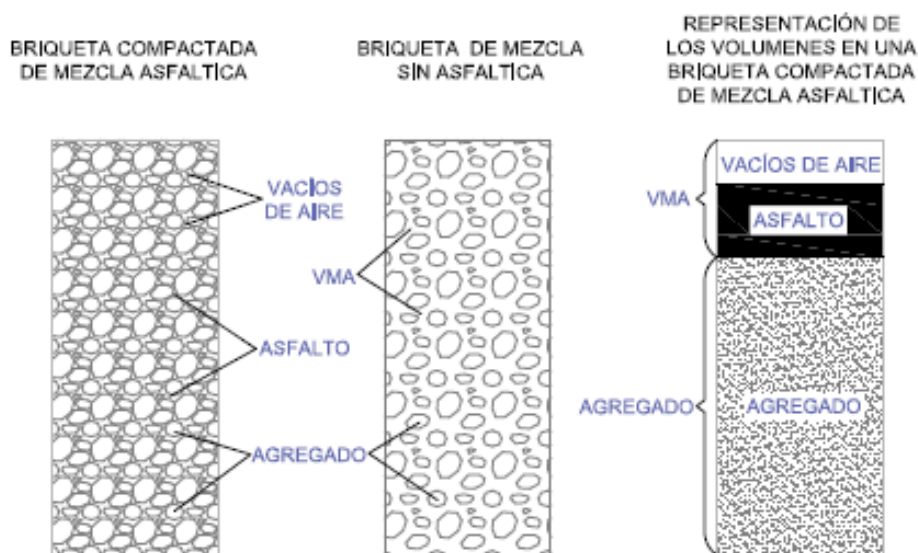
### 2.3.2.2 Vacíos de aire

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

### 2.3.2.3 Vacíos en el agregado mineral (vma)

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

Figura 6. Ilustración Del VMA En Una Probeta De Mezcla Compactada (Nota: Para Simplificar El Volumen De Asfalto Absorbido No Es Mostrado)



Fuente: Elaboración propia; Principios de Construcción de Pavimentos

Cuadro 3. Vacíos En El Agregado Mineral (Requisitos De VMA)

Tamaño máximo en mm	VMA mínimo, por ciento
---------------------	------------------------

porcentaje		Vacíos de Diseño, por ciento <sup>3</sup>		
mm	in	3.0	4.0	5.0
1.2	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.4	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.8	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19.0	3/4	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50.0	2.0	9.5	10.5	11.5
63.0	2.5	9.0	10.0	11.0

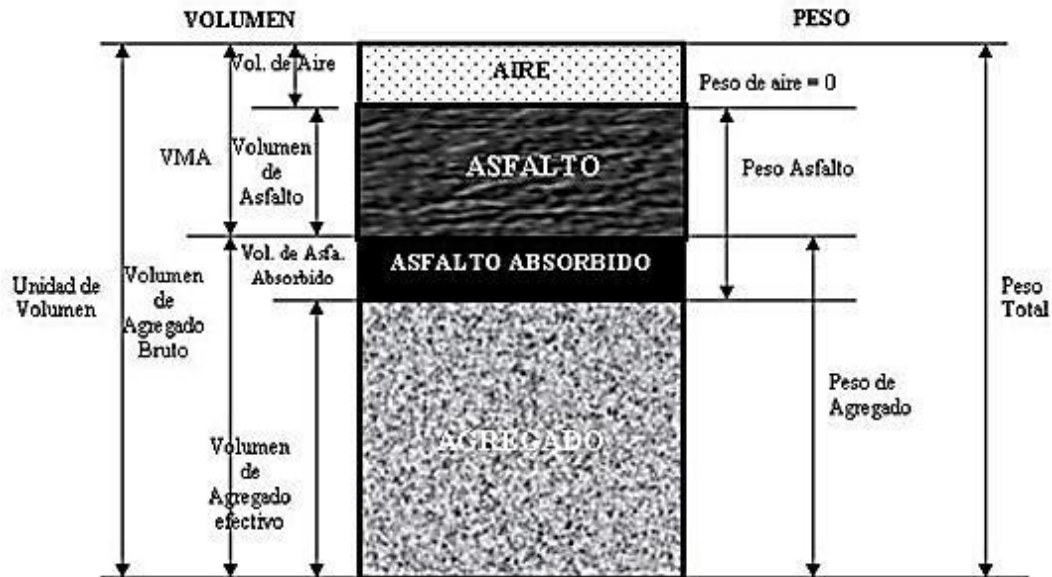
\* Especificación Normal para Tamaños de Tamices Usados en Pruebas, ASTM 11 [AASTHO M 92]  
 \* El Tamaño Máximo Nominal de Partículas es un tamaño más grande que el primer tamiz que retiene más del 10 % de material  
 \* Interpola el VMA mínimo para los valores de vacíos de diseño que se encuentran entre los que están citados

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos

#### 2.3.2.4 Cemento asfáltico

El contenido de asfalto de una mezcla en particular es establecido usando los criterios descritos por el método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran medida de su granulometría y la capacidad de absorción del agregado. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Si en una granulometría el porcentaje de finos es considerablemente alto, el área superficial total será mayor, requiriendo así mayor cantidad de asfalto para cubrir todas las partículas. Las mezclas gruesas exigen menos asfalto debido a que el área superficial total es menor. Si a la mezcla se le agregan pequeños incrementos de filler (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (No. 200)) existe una tendencia a absorber la mayor parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca. Caso contrario al efectuar pequeñas disminuciones de filler nos da como resultado una mezcla muy rica (húmeda).

Figura 7. Composición Típica Del Cemento Asfáltico



Fuente: Strategic Highway Research Program SHRP A-369, 1994.

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

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

### 2.3.2.5 Vacíos llenos de asfalto (vfa)

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

## 2.4 MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL

### **2.4.1 Metodología**

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

### **2.4.2 Propósito De La Metodología**

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

### **2.4.3 Descripción General**

El método Marshall usa muestras de ensayo (probetas) de 64 mm (2.5 pulg) de espesor por 102 mm (4 pulg) de diámetro. Una serie de muestras de ensayo, cada una con la misma combinación de agregados pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla asfáltica. Los dos aspectos principales del método de diseño son: análisis de densidad-vacíos y el ensayo de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior), Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. La Cuadro 13 presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la ASTM D 3515.

### **2.4.4 Especificaciones De La Metodología**

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios que se discutirán en este capítulo. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. El rango de vacíos de aire es de 3% al 5%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (Cuadro 14). Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

Cuadro 4. Graduaciones Propuestas Para Mezclas Cerradas

Apertura de los tamices	Mezclas Cerradas								
	Tamaño Máximo Nominal del Agregado								
	2 pulg (50,0 mm)	1 1/2 pulg (37,5 mm)	1 pulg (25,0 mm)	3/4 pulg (19,0 mm)	1/2 pulg (12,5 mm)	3/8 pulg (9,5 mm)	No. 4 (4,75 mm)	No. 8 (2,36 mm)	No. 16 (1,16 mm)
Gradaciones para Mezclas de Agregado (Grueso, Fino y Filler)									
2 1/2" (63 mm)	100	---	---	---	---	---	---	---	---
2" (50 mm)	90-100	100	---	---	---	---	---	---	---
1 1/2" (37,5 mm)	---	90-100	100	---	---	---	---	---	---
1" (25,0 mm)	60-80	---	90-100	100	---	---	---	---	---
3/4" (19,0 mm)	---	56-80	---	90-100	100	---	---	---	---
1/2" (12,5 mm)	35-65	---	56-80	---	90-100	100	---	---	---
3/8" (9,5 mm)	---	---	---	---	---	90-100	100	---	---
No. 4 (4,75 mm)	14-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85	80-100	---	---
No. 8 (2,36 mm)	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	65-100	---	100
No. 16 (1,18 mm)	---	---	---	---	---	---	40-80	---	95-100
No. 30 (600 µm)	---	---	---	---	---	---	35-65	---	70-95
No. 50 (300 µm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	---	45-75
No. 100 (150 µm)	---	---	---	---	---	---	3-20	---	20-40
No. 200 (75 µm)	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10	---	9-20
Asfalto, Porcentaje con Respecto al Peso Total de la Mezcla									
	2-7	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12	6-12	7-12	8-12

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

Cuadro 5. Criterios Del Instituto Del Asfalto Para El Diseño Marshall

CRITERIOS PARA MEZCLA DEL MÉTODO MARSHALL	TRANSITO LIVIANO CARPETA Y BASE		TRANSITO MEDIANO CARPETA Y BASE		TRANSITO PESADO CARPETA Y BASE	
	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
Compactación, numero de golpes en cada cara de la probeta	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N(lb)	336 (750)	-	5358 (1200)	-	8006 (1800)	-
Flujo, 0.25mm (0.01pulg)	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% VMA	Ver Cuadro Correspondiente					
% VFA	70	80	65	78	65	75

Notas

<sup>1</sup> Todos los criterios y no solo estabilidad, deben ser considerados al diseñar una mezcla asfáltica de pavimentación. Las mezclas asfálticas en caliente de base que no cumplan estos criterios, cuando se ensayen a 60 °C, se consideraran satisfactorias si cumplen los criterios cuando se ensayen a 38 °C, y si se colocan a 100 mm o más por debajo de la superficie. Esta recomendación se aplica solamente a las regiones que tengan una variedad de condiciones climáticas similar a la que prevalece en casi todas las regiones de Estados Unidos. En las regiones que tengan condiciones climáticas más extremas puede ser necesario usar temperaturas más bajas de ensayo.

<sup>2</sup> Clasificaciones del Transito  
 Liviano Condiciones de transito que resultan en un ESAL de diseño < 104  
 Mediano Condiciones de transito que resultan en un ESAL de diseño entre 104 y 106  
 Pesado Condiciones de transito que resultan en un ESAL de diseño > 106

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

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

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

<sup>6</sup> El porcentaje de vacíos en el agregado mineral debe ser calculado con base en el peso específico total ASTM del agregado.

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

Cuadro 6. Porcentaje Mínimo De VMA

TAMAÑO MÁX. en mm PORCENTAJE		VMA MÍNIMO, POR CIENTO Vacíos de Diseño, por ciento <sup>3</sup>		
mm	pulg	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	½	13.0	14.0	15.0
19.0	¾	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50.0	2.0	9.5	10.5	11.5
63.0	2.5	9.0	10.0	11.0

<sup>1</sup> Especificación Normal para Tamaño de Tamices usados en Pruebas AASHTO M 92 (ASTM E 11).

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

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

Fuente: Principios de Construcción de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS 22, Asphalt Institute

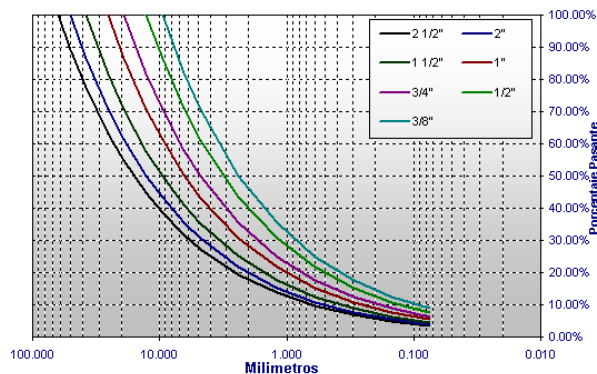
## 2.4.5 Evaluación Y Ajustes De Una Mezcla De Diseño

Cuando se desarrolla una mezcla de diseño, es necesario hacer varias mezclas de prueba para encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño. Cada una de las mezclas de prueba sirve como una guía para evaluar y ajustar las pruebas siguientes. Para diseño de mezclas preliminares o exploratorias, es aconsejable comenzar con una graduación de agregado que se acerque a la media de los límites establecidos. Las mezclas de prueba iniciales sirven para establecer la fórmula de trabajo y verificar que la graduación del agregado esté dentro de los límites especificados puede ser reproducida en una planta mezcladora.

Cuando las mezclas de pruebas iniciales fallan con los criterios de diseño en cualquier contenido de asfalto seleccionado, será necesario modificar o, en algunos casos, rediseñar la mezcla. Para corregir una deficiencia, la manera más fácil de rediseñar una mezcla es cambiar la graduación de los agregados ajustando los porcentajes utilizados. Frecuentemente este ajuste es suficiente para cumplir con las especificaciones.

Las curvas granulométricas son de gran ayuda al hacer los ajustes necesarios en los diseños de mezclas. Por ejemplo, las curvas obtenidas de la ecuación de Densidad Máxima de Fuller representan condiciones de densidad máxima y valores mínimos de vacíos en el agregado mineral (VMA). Las mezclas asfálticas que poseen dichas curvas presentan contenidos de vacío que pueden ser demasiado bajos. Generalmente, cualquier desviación de estas curvas resulta en densidades menores y valores más altos de VMA. La magnitud del cambio en la densidad y en el VMA depende de la cantidad de ajustes hechos en el contenido de agregado grueso o fino de la mezcla.

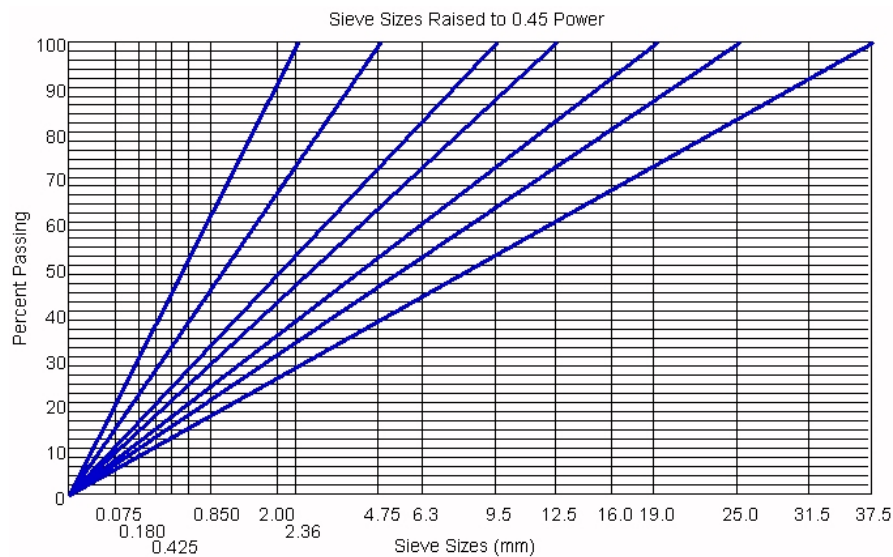
Figura 8. Curvas Fuller De Máxima Densidad (Gráfico Normalizado Semi-Log)



Fuente: Principios de Construcción de Mezclas Asfálticas en Caliente, MS 22, Asphalt Institute

La Figura siguiente muestra curvas de densidad máxima dibujadas sobre un gráfico de granulometría de la Administración Federal de Carreteras (FHWA) (USA) (basada en una escala donde las aberturas de los tamices se elevan a una potencia de 0.45). Muchos diseñadores encuentran conveniente la Gráfica del FHWA para hacer ajustes en la granulometría del agregado. Las curvas en la gráfica del FHWA pueden hallarse usando la ecuación de densidad máxima de Fuller, o dibujando una línea recta desde el origen, en la parte inferior izquierda de la gráfica, hasta el tamaño máximo nominal de partícula deseado, en la parte superior. Las granulometrías que se acercan a las líneas rectas tienen, generalmente, valores bajos de VMA, y deben ser ajustadas alejándolas de estas líneas. Dichos ajustes aumentan los valores de VMA, permitiendo así el uso de suficiente asfalto para poder obtener máxima durabilidad sin causar exudación en la mezcla.

Figura 9. Curvas De Densidad Máxima Basadas En Un Gráfico FHWA (Potencia De 0.45) De Granulometría



Fuente: <http://www.pavementinteractive.org>

## 2.4.5.1 Lineamientos generales para ajustar las mezclas de prueba

### 4.2.5.1.1 Bajo contenido de vacíos y estabilidad baja

Los vacíos pueden incrementarse en diferentes formas. Como un acercamiento general para lograr vacíos altos en el agregado mineral (en consecuencia proveer de suficientes espacios, para una adecuada cantidad de asfalto y vacíos de aire), la graduación del agregado debe ajustarse mediante la adición de más agregado grueso o fino. Si el contenido de asfalto es

más alto de lo normal y el exceso no es necesario para remplazar el absorbido por el agregado, entonces el contenido de asfalto deberá reducirse a fin de incrementar el porcentaje de vacíos, proveyendo un adecuado VMA. Se deberá recordar que disminuir el porcentaje de asfalto podrá tender a bajar la durabilidad del pavimento.

Demasiada reducción en el contenido de asfalto puede ocasionar fracturación, oxidación acelerada e incremento de la permeabilidad. Si los ajustes anteriores no producen una mezcla estable, el agregado tendrá que cambiarse. Es también posible mejorar la estabilidad e incrementar el contenido de vacíos en el agregado de la mezcla, mediante el incremento del agregado grueso o reducción de la cantidad de material que pasa la malla No. 200. Con la incorporación de arena procesada, el contenido de vacíos puede mejorarse sin sacrificar la estabilidad de la mezcla.

#### **4.2.5.1.2 Bajo contenido de vacíos y estabilidad satisfactoria**

Bajos contenidos de vacíos pueden eventualmente resultar en inestabilidad debido a flujo plástico o después de que el pavimento ha sido expuesto al tránsito por un periodo de tiempo ante la reorientación de las partículas y compactación adicional. Por su parte, insuficientes vacíos pueden ser producto de la cantidad requerida de asfalto para obtener una durabilidad alta en mezclas finas; sin embargo, la estabilidad es inicialmente satisfactoria por el tránsito específico. Una degradación de agregado pobre durante la producción de la mezcla y/o bajo la acción de tránsito puede ocasionar subsecuentemente inestabilidad y flujo si el contenido de vacíos de la mezcla no es suficiente. Por estas razones, mezclas con vacíos bajos tendrán que ajustarse por uno de los métodos dados.

#### **4.2.5.1.3 Contenido satisfactorio de vacíos y estabilidad baja**

La baja estabilidad cuando los vacíos y la graduación del agregado son satisfactorios, puede indicar algunas deficiencias en el agregado. Se deberán tomar consideraciones para mejorar la forma de la partícula de los agregados utilizando material producto de trituración o incrementando el porcentaje de agregado grueso en la mezcla o posiblemente aumentando el tamaño máximo del agregado. Partículas de agregado con textura rugosa y superficies menos

redondeadas, presentan más estabilidad cuando se mantiene o incrementa el volumen de vacíos.

#### **4.2.5.1.4 Contenido alto de vacíos y estabilidad satisfactoria**

Altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente con mezclas con alta permeabilidad; al permitir la circulación de aire y agua a través de la mezcla asfáltica pueden ocasionar endurecimiento prematuro del asfalto, desprendimiento del agregado, o posible desprendimiento del asfalto en el agregado. Aun cuando la estabilidad es satisfactoria, se deberán realizar ajustes para reducir los vacíos. Pequeñas reducciones se lograrán mediante la adición de polvo mineral a la mezcla. Podría ser necesario seleccionar o combinar agregados para lograr una graduación, la cual deberá estar cerca de la curva de máxima densidad.

#### **4.2.5.1.5 Vacíos altos y estabilidad baja**

Se deberán tomar en cuenta dos pasos para este tipo de condiciones; el primero es ajustar el volumen de vacíos mediante los métodos discutidos en los puntos anteriores; y en el segundo, si los ajustes no mejoran la estabilidad, deberá hacer una consideración de la calidad de los materiales.

### **2.4.6 Ensayos Realizados A La Mezcla Asfáltica Compactada**

En el método Marshall se llevan a cabo tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas.

#### **2.4.6.1 Resistencia de mezclas bituminosas al flujo plástico utilizando el aparato Marshall**

Basado en norma AASHTO: T 245-97, El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

Sumergir el espécimen en un baño maría a  $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  de 30 a 40 minutos antes de la prueba. Remueva el espécimen de ensayo del baño maría y cuidadosamente se secará la superficie. Colocándolo y centrándolo en la mordaza inferior, se procederá a colocará la mordaza superior y se centrará completamente en el aparato de carga. Posteriormente se aplica la carga

de prueba al espécimen a una velocidad constante de 50.8 mm/min (2 pulg/min), hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

Mientras que el ensayo de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0.25 mm (1/100 “) será el valor del flujo Marshall.

#### **2.4.6.2 Análisis de densidad de vacíos**

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. Resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima (AASHTO T 209) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores. Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (Va); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

### **2.5 DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS**

#### **2.5.1 Comprobación Granulométrica**

Cuando se tienen establecidos los porcentajes para cada uno de los agregados el procedimiento sigue con una comprobación granulométrica que se puede afirmar que es la combinación real, y es simplemente la verificación que indica que se puede reproducir la combinación teórica, dicha comprobación se realiza según el ensayo basado en AASHTO T 27 o el ensayo AASHTO: T 11-97 que es granulometría.

## 2.5.2 Dosificación De Agregados

El procedimiento para dosificación de agregado que se utilizará en el método de diseño que se explica en este documento es el que recomienda la norma AASHTO T 245, que es la que rige el procedimiento de elaboración de las briquetas por el Método Marshall para luego ser ensayadas para la Resistencia a la Estabilidad y Flujo, el ensayo recomienda, que los agregados se separen por tamizado seco en ciertas fracciones y recomienda los rangos. Según el tamaño máximo de los agregados (3/4") que se utilizan en el diseño, se toman las siguientes fracciones de tamaño:

- 19.0 mm a 9.5 mm (3/4 a 3/8 pulg.)
- 9.5 mm a 4.75 mm (3/8 pulg. a No. 4)
- 4.75 mm a 2.36 mm (No. 4 a No. 8)
- Pasa 2.36 mm (No. 8)

Cuadro 7. Composición Típica Del Cemento Asfaltico

Designación de la mezcla usando el tamaño máximo nominal de agregados					
Tamaño de tamiz	37.5 mm	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.5 mm
50 mm (2 in.)	100				
37.5 mm (1 ½ in.)	90 a 100	100	-	-	-
25.0 mm (1 in.)	-	90 a 100	100	-	-
19.0 mm (¾ in.)	56 – 80	-	90 a 100	100	-
12.5 mm (½ in.)	-	56 a 80	-	90 – 100	100
9.5 mm (3/8 in.)	-	-	56 a 80	-	90 – 100
4.75 mm (Nº 4)	23 – 53	29 – 59	35 – 65	44 – 54	55 – 85
2.36 mm (Nº 8)	15 – 41	19 – 45	23 – 49	28 – 58	32 – 67
1.18 mm (Nº 16)	-	-	-	-	-
0.60 mm (Nº 30)	-	-	-	-	-
0.30 mm (Nº 50)	4 a 16	5 a 17	5 a 19	5 a 21	7 a 23
0.15 mm (Nº 100)	-	-	-	-	-
0.075 mm (Nº 200)	0 – 5	1 a 7	2 a 8	2 a 10	2 a 10
% en peso, asfalto	3 a 8	3 a 9	4 a 10	4 a 11	5 a 12

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente del Asphalt Institute

## 2.6 PROPIEDADES CONSIDERADAS EN EL DISEÑO DE LAS MEZCLAS

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.

### **2.6.1 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 más 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) está 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 más 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, en lugares donde se espere tráfico liviano, utilizando agregados con valores menores de fricción interna.

La fuerza ligante de la cohesión aumenta con aumentos en la frecuencia de carga (tráfico). La cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. Adicionalmente, y hasta cierto nivel, la

cohesión aumenta con aumentos en el contenido de asfalto. Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdida de fricción entre partículas-

Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en los pavimentos.

Cuadro 8. Causas Y Efectos De Inestabilidad En El Pavimento

CAUSAS	EFFECTOS
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulación, ahuellamientos y afloramiento exudación
Exceso de arena de tamaño media en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahuellamientos y canalización

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos

### 2.6.2 Durabilidad

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

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

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

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

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

Cuadro 9. Causas Y Efectos De Una Poca Durabilidad

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

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos

### 2.6.3 Impermeabilidad

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

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.

Cuadro 10. Causas Y Efectos De La Permeabilidad

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

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos

#### 2.6.4 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. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría.

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

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

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

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Usualmente son el producto de una falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano., partículas lisas y redondeadas de agregado, y/o demasiada humedad en la mezcla.

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

Cuadro 11. Causas Y Efectos De Problemas En La Trabajabilidad

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

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos

### 2.6.5 Flexibilidad

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

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

### 2.6.6 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.

Cuadro 12. Causas Y Efectos De Una Mala Resistencia A La Fatiga

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

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos

### 2.6.7 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 esté mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo). La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento, y a una velocidad de 65 km/hr (40 mi/hr).

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5 mm (3/8 pulgadas) a 12.5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados

debe resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimiento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

Cuadro 13. Causas Y Efectos De Poca Resistencia Al Deslizamiento

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

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos

## 2.7 METODO MARSHALL DE DISEÑO DE MEZCLAS – DESCRIPCIÓN

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

### 2.7.1 Preparación Para Efectuar Los Procedimientos

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

#### 2.7.1.1 Selección de las muestras de material

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

pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en el laboratorio tienen características idénticas a los ingredientes usados en el producto final.

Una amplia variedad de problemas graves, que van desde una mala trabajabilidad de la mezcla hasta una falla prematura del pavimento, son el resultado histórico de variaciones ocurridas entre los materiales ensayados en el laboratorio y los materiales usados en la realidad.

### **2.7.1.2 Preparación del agregado**

La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va a ser usado debe ser ya conocida para establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio.

En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar exactamente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico, y efectuar un análisis granulométrico por lavado.

#### **❖ Secando el agregado**

El Método Marshall requiere que los agregados ensayados estén libres de humedad, tan práctico como sea posible. Esto evita que la humedad afecte los resultados de los ensayos.

Una muestra de cada agregado a ser ensayado se coloca en una bandeja, por separado, y se calienta en un horno a una temperatura de 110° C (230°F).

Después de cierto tiempo, la muestra caliente se pesa y, se registra su valor.

La muestra se calienta completamente una segunda vez, y se vuelve a pesar y a registrar su valor. Este procedimiento se repite hasta que el peso de la muestra permanezca constante después de dos calentamientos consecutivos, lo cual indica que la mayor cantidad posible de humedad se ha evaporado de la muestra.

#### **❖ Análisis granulométrico por vía húmeda**

El análisis granulométrico por vía húmeda es un procedimiento para identificar las proporciones de partículas de tamaño diferente en las muestras del agregado. Esta información es importante porque las especificaciones de la mezcla deben estipular las

proporciones necesarias de partículas de agregado de tamaño diferente, para producir una mezcla en caliente final con las características deseadas.

El análisis granulométrico por vía húmeda consta de los siguientes pasos:

1. Cada muestra de agregado es secada y pesada.
2. Luego de cada muestra es lavada a través de un tamiz de 0.075 mm (Nº 200), para remover cualquier polvo mineral que esté cubriendo el agregado.
3. Las muestras lavadas son secadas siguiente el procedimiento de calentado y pesado descrito anteriormente.
4. El peso seco de cada muestra es registrado. La cantidad de polvo mineral puede ser determinada si se comparan los pesos registrados de las muestras antes y después del lavado.
5. Para obtener pasos detallados del procedimiento referirse a la norma AASHTO T 11.

#### ❖ **Determinación del Peso Específico**

El peso específico de una sustancia es la proporción peso - volumen de una unidad de esa sustancia comparada con la proporción peso - volumen de una unidad igual de agua.

El peso específico de una muestra de agregado es determinado al comparar el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, a la misma temperatura. El peso específico del agregado se expresa en múltiplos del peso específico del agua (la cual siempre tiene un valor de 1). Por ejemplo, una muestra de agregado que pese dos y media veces más que un volumen igual de agua tiene un peso específico de 2.5.

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

#### **2.7.1.3 Preparación de las muestras (probetas) de ensayo**

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con

los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

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

## **2.7.2 Procedimiento De Ensayo Marshall**

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

### **2.7.2.1 Determinación del peso específico de la biqueta**

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

### **2.7.2.2 Ensayo de estabilidad y fluencia**

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

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

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

### **2.7.2.3 Valor de estabilidad Marshall**

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador del cuadrante. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de Estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor.

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

### **2.7.2.4 Valor de fluencia Marshall**

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

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

#### **2.7.2.5 Análisis de densidad y vacíos**

Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de briquetas de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

#### **2.7.2.6 Análisis de vacíos**

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada briqueta compactada y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Este último puede ser calculado a partir de los pesos específicos del asfalto y el agregado de la mezcla, con un margen apropiado para tener en cuenta la cantidad de asfalto absorbido por el agregado, o directamente mediante un ensayo normalizado (AASHTO T 2091) efectuado sobre la muestra de mezcla sin compactar. El peso específico total de las probetas compactadas se determina pesando las probetas en aire y en agua.

##### **❖ Análisis de Peso Unitario**

El peso unitario promedio para cada muestra se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por 1000 Kg/m<sup>3</sup> (62.4 lb/ft<sup>3</sup>).

##### **❖ Análisis de VMA**

Los vacíos en el agregado mineral, VMA, está definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada, incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla. El VMA es calculado con base en el peso

específico total del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. Por lo tanto, el VMA puede ser calculado al restar el volumen de agregado (determinado mediante el peso específico total del agregado) del volumen total de la mezcla compactada.

#### ❖ **Análisis de VFA**

Los vacíos llenos de asfalto, VFA, son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA se calcula al restar los vacíos de aire de VMA, y luego dividiendo por el VMA, y expresando el valor final como un porcentaje.

# **CAPITULO III**

## **INVESTIGACIÓN DE LA CORRELACIÓN DE LA TEXTURA CON LAS PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFALTICA**

### **3 INVESTIGACIÓN DE LA CORRELACION DE LA TEXTURA CON LAS PROPIEDADES DE LA MEZCLAS ASFALTICA**

#### **3.1 PRINCIPIO DE LA INVESTIGACIÓN**

La Finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores del firme, para que resulten seguras y confortables. A estas capas superiores de le denomina pavimento.

Figura 10. Textura De Pavimentos



Fuente: Fotografía Propia

Los pavimentos están compuestos por agregados minerales (Grava, Arena y/o Filler) y el cemento asfáltico, que es el aglomerante de la mezcla. Las propiedades de la superficie es decir de la textura de acabado superficial es definida por las características físicas los agregados minerales que son también los que definen junto con el cemento asfáltico las características mecánicas de las de las mezclas asfálticas de las cuales están hechos los pavimentos flexibles.

### **3.2 LABORATORIOS EMPLEADOS**

Para el presente proyecto se empleó los laboratorios de la Universidad Juan Misael Saracho y el laboratorio de Servicio Departamental de Caminos (SEDECA, Tarija).

En los Laboratorios de la UAJMS se realizaron los ensayos de la caracterización de los agregados petrosos. En tanto que en los laboratorios de SEDECA se realizó los ensayos del cemento asfáltico, de las mezclas asfálticas, elaboración de las briquetas y la medición de la macro textura.

### **3.3 APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE LOS ENSAYOS A LOS AGREGADOS PETREOS**

Las propiedades de origen del agregado son aquellas frecuentemente utilizadas para calificar las fuentes de agregados. El cumplimiento de estas propiedades es importante y son específicas de la fuente de origen.

#### **3.3.1 Banco De Materiales**

San José de Charaja.- se encuentra ubicado pasando el Valle de la Concepción, ruta hacia Chocloca a 35 minutos de la ciudad de Tarija dónde se procesa el material chancado, tanto la grava, gravilla y arena, donde también se encuentra almacenado el cemento asfáltico. Y se obtuvo el material natural del mismo lugar.

### 3.3.2 Muestreo

Figura 11. Muestreo



Fuente: Fotografías Propias

De acuerdo a norma (AASHTO T 2-91) del método para extraer y preparar muestras, de tal manera que se verifique que tengan las características requeridas en cuanto al material fino y grueso, como ser los naturales y los chancados.

Aplicando el método establecido en norma se extrajo el material granular a emplear en el proyecto.

### 3.3.3 Granulometría De Los Agregados

Los siguientes cuadros resumen muestran la composición granulométrica de los agregados empleados tanto los naturales como así también los chancados.

Cuadro 14. Granulometría Del Material Chancado

Tamices	% que pasa 3/4"	% que pasa 3/8"	% que pasa Arena Chancada"
---------	-----------------	-----------------	----------------------------

1"	100		
3/4"	98,9		
1/2"	21,8	100	
3/8"	2	90,8	100
Nº 4	0,7	20,2	98,6
Nº 8	0,7	13,9	8,4
Nº 10	0,7	7,6	82,2
Nº 16	0,7	6,6	72
Nº 40	0,7	4,7	44,6
Nº 50	0,7	4,1	37,4
Nº 80	0,4	3,4	30
Nº 200	0,3	2	18,1

### 3.3.4 Características De Los Agregados

Cumpliendo con la norma AASHTO, se cuenta con los siguientes cuadros resumen de las características de los agregados.

Cuadro 15. Características De Los Agregados Chancados

AGREGADOS					
Ensayo	Unid.	Resultados	Especificaciones		Designación
			Mínimo	Máximo	AASHTO
Peso específico agregado grueso	gr./cm <sup>3</sup>	3			T-166
Peso específico agregado fino	gr./cm <sup>3</sup>	3			T-100
Laminaridad Material (3/4")	%	0,24		15	
Laminaridad Material (3/8")	%	2,68		15	
Chatas y Alargadas (3/4")	%	0,24		10	
Chatas y Alargadas (3/8")	%	2,5		10	
Desgaste de Los Ángeles (3/4")	%	22,92		40	T-96
Desgaste de Los Ángeles (3/8")	%	23,08			
Durabilidad Agregado Grueso	%	6,12		12	T-104
Durabilidad Agregado Fino	%	7,76			
Caras Fracturadas (3/4")	%	95,4	75		
Caras Fracturadas (3/8")	%	99,5			
Límite Plástico	%	N.P.			T-90
Equivalente de arena	%	59,2	45		T-176

### 3.3.5 Características Del Cemento Asfáltico

El control de calidad del cemento asfáltico procedente de los depósitos de almacenado de San José de Charaja, cumplen con las especificaciones de requerimiento. La muestra se obtuvo directamente de los turriles del almacenamiento.

Figura 12. Almacenamiento Asfáltico



Fuente: Elaboración Propia

Seguidamente, se muestra un cuadro resumen de los resultados que se obtuvieron a partir de los ensayos para determinar las características del cemento asfáltico en base a la norma.

Cuadro 16. Características Del Cemento Asfáltico

CEMENTO ASFÁLTICO 85 - 100					
Ensayo	Unidad	Resultados	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Peso específico	gr./cm <sup>3</sup>	1.008	1.00	1.050	T-228
Punto de Inflamación	°C	>232	232		T-48
Penetración a 25 °C; 100 gr., 5 seg.	mm.	89	85	100	T-49
Punto de Ablandamiento	°C	44	49		T-53
Viscosidad Saybol Furol a 135°C	seg.	133	100		T-72

Fuente: Elaboración Propia

### 3.4 CONTENIDO ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO

De acuerdo a las características de los agregados pétreos, como así también del cemento asfáltico, podemos realizar el diseño de la mezclas asfáltica.

#### 3.4.1 Granulometría De Diseño

Basándonos en el método de tanteos (por razonamiento lógico) para el encuadramiento de la granulometría de diseño dentro de los límites establecidos. Para su aplicación en el proyecto.

Cuadro 17. Límites De Gradación

Tamices	Tamaño Máximo Nominal del Agregado $\frac{3}{4}$ mm Porcentaje total que pasa	
	Mínimo	Máximo
1"	100	100

¾"	80	100
½"	67	85
3/8"	60	77
Nº 4	43	54
Nº 10	29	45
Nº 40	14	25
Nº 80	8	17
Nº 200	4	8

Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.1.1 Composición de la curva para diseñar la mezcla

Ajustándonos a las exigencias de las especificaciones de diseño de mezclas asfálticas por la Metodología Marshall y haciendo un análisis de los áridos a emplear en el diseño se presenta el cuadro resumen de la mezcla asfáltica que se requieren para elaborar el proyecto, así mismo se muestra en dicho cuadro la composición porcentual en peso.

Cuadro 18. Composición De La Gradación De La Mezcla

Material	Cantidad (%)
Grava Chancada ¾"	33
Grava Chancada 3/8"	26
Arena Chancada	41
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a las especificaciones de la granulometría del agregado pétreo para el diseño de mezclas asfálticas, la graduación establecida para la mezcla propuesta está dentro de los límites de acuerdo a norma.

### 3.4.2 Resultados Obtenidos Del Diseño De La Mezcla

Se realiza el diseño de las mezclas asfálticas en función a las granulometrías establecidas bajo los límites de la norma, se procedió a ejecutar el ensayo de dicha de mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall, esta metodología exige un 100% de material que pasa el tamiz de una pulgada (1"-25,4mm), y también que el tamaño máximo sea igual o menor a 2/3 del espesor del pavimento. A continuación, se muestra un cuadro resumen con los resultados obtenidos a partir de la aplicación de dicha metodología para el diseño de la mezcla.

Figura 13. Metodología Marshall



Fuente: Fotografías Propias

Cuadro 19. Características De Las Mezclas Asfálticas

DESCRIPCIÓN	MEZCLA
% de asfalto	5.03
Densidad Máxima Teórica (gr./cc)	2.358
Densidad Real de la Mezcla (gr./cc)	2,355
Vacíos de la mezcla en (%)	3.57
Vacíos del agregado mineral (%)	15.982
Relación bitumen vacíos	77.7
Estabilidad	2852.5
Fluencia (1/100")	9.13

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5 MEDICIONES DE LA MACRO TEXTURA

De acuerdo a la finalidad de este proyecto se hace la medición de macro textura aplicando las metodologías que a continuación se detallan. Las mediciones se las hace tanto en campo, es decir en la carretera Tarija el Valle cada 200 metros debido a la longitud del tramo que se extiende en 9.156 Km. Como así también en laboratorio, se hace la medición de la macro textura a las briquetas realizadas bajo el diseño establecido y calculado previamente, claro está que debido a su tamaño la medición de la macro textura se la hace en una escala diferente.

Se realiza la medición directa del diámetro del círculo de arena como mínimo 5 veces espaciadamente en la mancha de arena de acuerdo a la metodología A0805 de los Manuales Técnicos “Volumen 4: Ensayo de Suelos y Materiales”. Y se registra el promedio de las 5 mediciones realizadas. Se realizó una medición cada 50 m, es decir que, de cada tramo de 200 m se realizaron 4 mediciones de las cuales se establece un valor promedio representativo

de dicho tramo de 200 m. Obteniendo un total de 45 resultados del tramo carretero en cuestión.

En el caso de la aplicación de esta metodología en las briquetas realizadas, se define una escala diferente, es decir, se trabaja un menor valor de volumen de arena, para este estudio en particular se definió trabajar con una quinta parte del volumen utilizado para la medición en el tramo de aplicación, como en dicho tramo se estableció el empleo de 50 cm<sup>3</sup> de arena, entonces para la aplicación de esta metodología en la briquetas se utilizó tan solo 10 cm<sup>3</sup> de arena, debido a la limitada superficie que presenta las briquetas.

Figura 14. Textura Del Pavimento



Fuente: Fotografía Propia

Macro Textura:

Se aplica la metodología del Círculo de Arena para realizar la lectura de la macro textura, de acuerdo a la norma ASTM E 965, esta metodología nos permite conocer la Profundidad Media de la Macrotextura superficial del pavimento, mediante la aplicación de la siguiente ecuación, establecida en la norma antes mencionada.

$$MTD = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2}$$

Donde:

MTD: Profundidad media de macro textura, en mm.

V: Volumen de arena utilizada, en mm<sup>3</sup>.

D: Diámetro promedio del área cubierta por la arena, en mm.

Figura 15. Metodología Del Cirulo De Arena



Fuente: Fotografía Propia

Los resultados obtenidos de la aplicación de estas dos metodologías se muestran a continuación, se cuenta con 40 ensayos que se realizaron en laboratorio (a las briquetas) y 45 en campo (Tramo carretero en aplicación).

Cuadro 20. Datos Obtenidos Del Círculo De Arena

Nro.	Progresiva		Diámetro del Círculo de Arena		
	Inicial	Final	En Campo	Briqueta	En Laboratorio
1	0+000	0+200	27,1	B1	6,70
2	0+200	0+400	27,1	B2	6,70
3	0+400	0+600	27,5	B3	6,70
4	0+600	0+800	26,5	B4	6,60
5	0+800	1+000	27,6	B5	6,70
6	1+000	1+200	27,6	B6	6,30
7	1+200	1+400	27,3	B7	6,70
8	1+400	1+600	26,7	B8	6,80
9	1+600	1+800	27,4	B9	6,60
10	1+800	2+000	26,5	B10	6,70
11	2+000	2+200	26,6	B11	6,60
12	2+200	2+400	26,2	B12	6,80
13	2+400	2+600	24,8	B13	6,70
14	2+600	2+800	26,3	B14	6,70
15	2+800	3+000	26,9	B15	6,60
16	3+000	3+200	26,6	B16	7,10
17	3+200	3+400	26,7	B17	7,10
18	3+400	3+600	27,0	B18	7,10
19	3+600	3+800	27,3	B19	7,00
20	3+800	4+000	26,8	B20	7,10
21	4+000	4+200	26,8	B21	6,90
22	4+200	4+600	26,5	B22	7,10
23	4+600	4+800	26,9	B23	7,20
24	4+800	5+000	26,2	B24	6,90
25	5+000	5+200	27,4	B25	7,00
26	5+200	5+400	27,2	B26	7,02
27	5+400	5+600	27,0	B27	7,16
28	5+600	5+800	27,1	B28	7,08
29	5+800	6+000	27,5	B29	7,10
30	6+000	6+200	27,8	B30	7,02

31	6+200	6+400	26,8	B31	6,93
32	6+400	6+600	26,8	B32	6,92
33	6+600	6+800	26,6	B33	6,86
34	6+800	7+000	27,1	B34	6,93
35	7+000	7+200	26,2	B35	6,91
36	7+200	7+400	26,7	B36	6,74
37	7+400	7+600	25,4	B37	6,91
38	7+600	7+800	26,6	B38	6,85
39	7+800	8+000	26,6	B39	6,82
40	8+000	8+200	26,4	B40	6,82
41	8+200	8+400	25,9	---	---
42	8+400	8+600	27,0	---	---
43	8+600	8+800	26,3	---	---
44	8+800	9+000	27,0	---	---
45	9+000	9+156	26,3	---	---

Fuente: Elaboración Propia

### 3.6 CORRELACION DE LA TEXTURA Y LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS

Se realiza el proceso de depuración de datos a las variables dependientes que es este caso son: La DENSIDAD, ESTABILIDAD y la FLUENCIA de la mezcla asfáltica, para ello se hace el cálculo de los siguientes parámetros:

#### 3.6.1 Medidas De Tendencia Central

Cuadro 21. Medidas De Tendencia Central (Densidad)

Densidad (D)	Frecuencia (f)	Frecuencia Acumulada (F)
2,347	3	3
2,348	2	5
2,349	4	9
2,352	2	11
2,353	4	15
2,354	5	20
2,355	1	21
2,357	1	22
2,358	3	25
2,361	9	34
2,362	3	37
2,363	3	40

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 22. Medidas De Tendencia Central (Estabilidad)

Estabilidad	Frecuencia (f)	Frecuencia Acumulada (F)	Estabilidad	Frecuencia (f)	Frecuencia Acumulada (F)
1977,75	1	1	2748,52	1	21
2042,04	1	2	2756,48	1	22
2047,91	1	3	2771,88	1	23
2067,49	1	4	2772,38	1	24
2124,49	1	5	2785,37	1	25
2165,67	1	6	2798,87	1	26
2264,47	1	7	2805,16	1	27
2268,11	1	8	2813,40	1	28
2296,82	1	9	2831,25	1	29
2310,07	1	10	2843,62	1	30
2381,45	1	11	2893,08	1	31
2384,58	1	12	3016,74	1	32
2413,53	1	13	3051,42	1	33
2432,38	1	14	3066,99	1	34
2524,08	1	15	3069,35	1	35
2592,75	1	16	3084,63	1	36
2611,91	1	17	3099,24	1	37
2635,64	1	18	3105,21	1	38
2636,95	1	19	3122,86	1	39
2655,20	1	20	3126,14	1	40

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 23. Medidas De Tendencia Central (Fluencia)

Fluencia	Frecuencia (f)	Frecuencia Acumulada (F)	Fluencia	Frecuencia (f)	Frecuencia Acumulada (F)
9,65	1	1	9,95	1	21
8,29	1	2	10,12	1	22
8,36	1	3	10,2	1	23
8,55	1	4	10,25	1	24
8,59	1	5	10,5	1	25
8,66	1	6	10,75	1	26
8,84	1	7	10,91	1	27
8,85	1	8	11,21	1	28
8,91	1	9	11,46	1	29
9,1	1	10	11,81	1	30
9,19	1	11	12,00	1	31
9,35	1	12	12,02	1	32
9,38	1	13	12,30	1	33
9,49	1	14	12,35	1	34
9,65	1	15	12,55	1	35
9,68	1	16	12,85	1	36
9,74	1	17	13,15	1	37
9,9	1	18	13,40	1	38
9,93	1	19	13,52	1	39
9,95	1	20	16,23	1	40

Fuente: Elaboración propia

### 3.6.2 Media Aritmética

$$\bar{X} = \frac{x_1f_1 + x_2f_2 + \dots + x_mf_m}{n} = \frac{\sum_i^m x_i f_i}{n}$$

<b>Media</b>	
Densidad:	2,3557
Estabilidad:	2634,90
Fluencia:	10,539

### 3.6.3 Mediana

La media es el valor central de la muestra de datos

$$Me = \frac{x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}}{2}$$

ESTABILIDAD:

Me (Estabilidad)	2701,86
Me (Fluencia)	9,95

#### 3.6.3.1 Mediana de tabulación discreta

DENSIDAD:

$$\frac{n}{2} < F_j \quad \frac{40}{2} = 20 < 21$$

Me (Densidad)	2,355
---------------	-------

### 3.6.4 Moda

La moda es el valor que ocurre con mayor frecuencia. De tal manera tenemos:

<b>Parámetro</b>	<b>Moda (Mo)</b>
Densidad	2.357
Estabilidad	∅
Fluencia	∅

### 3.6.5 Rango

$$R = X_{max} - X_{min}$$

$$R = 2.360 - 2.352 = 0.008$$

PARAMETRO	MÁXIMO	MÍNIMO	Δ
-----------	--------	--------	---

Densidad	2.363	2.347	0.016
Estabilidad	3126.14	1977.75	1148.39
Fluencia	16.23	8.29	7.94

Al observar el resultado de la diferencia de los datos máximos y mínimos, se puede observar que existe dispersión entre los datos, para que los datos sean homogéneos los valores extremos deben ser similares. La densidad es un parámetro que no tiene mucha dispersión de sus datos, los otros dos parámetros cuentan con más dispersión, siendo la fluencia con el valor con más dispersión.

### 3.6.6 Desviación Media

$$DM = \frac{\sum_{j=1}^n |X - \bar{X}|}{n}$$

PARÁMETRO	DESVIACIÓN MEDIA (DM)
Densidad	0.0014
Estabilidad	293.38
Fluencia	1.20

### 3.6.7 Varianza

#### 3.6.7.1 Poblacional

$$S^2 = \frac{\sum_1^m (X_i - \bar{X})^2 f_i}{n}$$

PARÁMETRO	VARIANZA POBLACIONAL (S <sup>2</sup> )
Densidad	5.89E-08
Estabilidad	56928959.8
Fluencia	11.75

#### 3.6.7.2 Muestral

$$\sigma^2 = \frac{\sum_1^m (X_i - \bar{X})^2 f_i}{n - 1}$$

PARÁMETRO	VARIANZA MUESTRAL (σ <sup>2</sup> )
Densidad	5.70E-08
Estabilidad	55505735.8
Fluencia	11.45

La varianza se interpreta como como una medida de cuán diversos son los datos obtenidos

### 3.6.8 Desviación Estándar

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

PARÁMETRO	DESVIACIÓN ESTANDAR MUESTRAL ( $\sigma$ )
Densidad	0.00542
Estabilidad	350.521
Fluencia	1.765

Por tanto el error estándar es de 0.00024, 7545.13 y 3.43 respectivamente, estos valores permiten conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media, cuándo no se explica que varianza se utiliza, se toma el valor de la varianza muestral.

### 3.6.9 Coeficiente De Variación

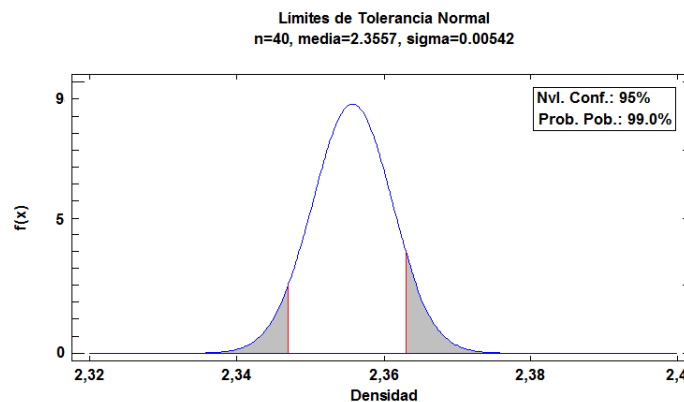
$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} 100\%$$

PARÁMETRO	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)
Densidad	0.23 %
Estabilidad	13.30%
Fluencia	16.75%

## 3.7 DEPURACIÓN DE DATOS

DENSIDAD:

Figura 16. Límites De Tolerancia (Densidad)



Fuente: Elaboración propia, Statgraphics

### Límites de tolerancia estadística:

Tamaño de muestra = 40

Media de la muestra = 2,3557

Desviación estándar de la muestra = 0.00542

Intervalos de tolerancia del 95,0% para 99,0% de la población.

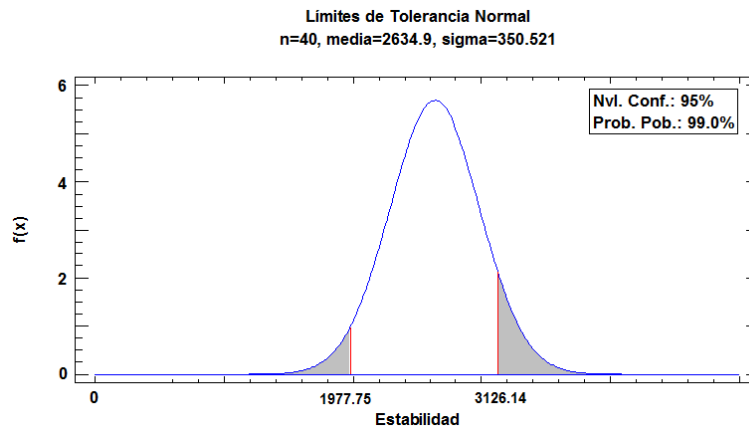
Cuadro 24. Puntos Depurados (Densidad)

Densidad	Diámetro (C.A.)
2,347	7,17
2,363	6,58
2,353	7,02
2,362	6,63
2,361	6,71
2,362	6,64
2,361	6,66
2,353	6,91
2,361	6,68
2,361	6,68
2,361	6,69
2,357	6,82
2,361	6,72
2,361	6,73
2,361	6,75
2,358	6,76
2,358	6,78
2,358	6,82
2,349	7,08
2,355	6,85
2,354	6,86
2,352	7,04
2,354	6,88
2,354	6,88
2,354	6,88
2,354	6,87
2,353	6,96
2,353	7,01
2,348	7,10
2,352	7,04
2,347	7,15
2,349	7,08
2,349	7,09
2,349	7,09
2,348	7,11
2,347	7,13
2,361	6,67
2,363	6,59
2,363	6,33
2,362	6,63

Fuente: Elaboración propia

ESTABILIDAD:

Figura 17. Límites De Tolerancia (Estabilidad)



Fuente: Elaboración propia, Statgraphics

**Límites de tolerancia estadística:**

Tamaño de muestra = 40

Media de la muestra = 2634.90

Desviación estándar de la muestra = 350.521

Intervalos de tolerancia del 95,0% para 99,0% de la población.

Cuadro 25. Puntos Depurados (Estabilidad)

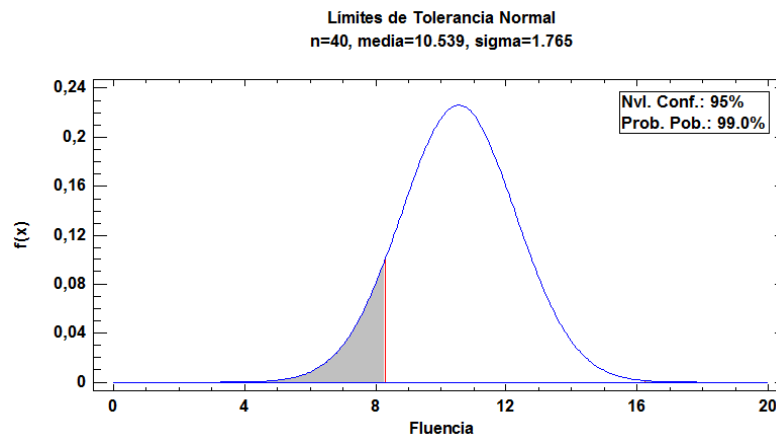
Estabilidad	Diámetro (C.A.)
3069,35	7,09
2042,04	6,58
2798,87	6,91
3122,86	7,15
2124,49	6,63
2165,67	6,64
2264,47	6,66
2268,11	6,67
2296,82	6,68
2771,88	6,88
2381,45	6,69
2384,58	6,71
2805,16	6,96
2432,38	6,73
2524,08	6,75
2592,75	6,76
2611,91	6,78
2635,64	6,82
2636,95	6,82
2655,20	6,85
2748,52	6,86
2756,48	6,87
2413,53	6,72
2772,38	6,88

3016,74	7,08
2310,07	6,68
3126,14	7,17
2813,40	7,01
2831,25	7,02
2843,62	7,04
2893,08	7,04
1977,75	6,33
3051,42	7,08
3066,99	7,09
2067,49	6,63
3084,63	7,10
3099,24	7,11
3105,21	7,13
2047,91	6,59
2785,37	6,88

Fuente: Elaboración propia

FLUENCIA:

Figura 18. Límites De Tolerancia (Fluencia)



Fuente: Elaboración propia, Statgraphics

### Límites de tolerancia estadística:

Tamaño de muestra = 40

Media de la muestra = 10.539

Desviación estándar de la muestra = 1.765

Intervalos de tolerancia del 95,0% para 99,0% de la población.

Cuadro 26. Puntos Depurados (Fluencia)

Fluencia	Diámetro (C.A.)
13,15	7,11
8,29	6,58
12,55	7,09
8,55	6,63
8,59	6,63
16,23	7,17
10,20	6,88
8,85	6,67
8,91	6,68
8,84	6,66
9,19	6,69
9,35	6,71
9,38	6,72
9,49	6,73
10,25	6,88
9,65	6,33
9,74	6,78
9,90	6,82
9,93	6,82
13,40	7,13
9,95	6,86
10,12	6,87
10,91	6,96
11,46	7,02
10,50	6,88
10,75	6,91
9,65	6,75
11,21	7,01
9,68	6,76
11,81	7,04
12,00	7,04
12,02	7,08
12,30	7,08
12,35	7,09
8,66	6,64
12,85	7,10
8,36	6,59
9,10	6,68
13,52	7,15
9,95	6,85

Fuente: Elaboración propia

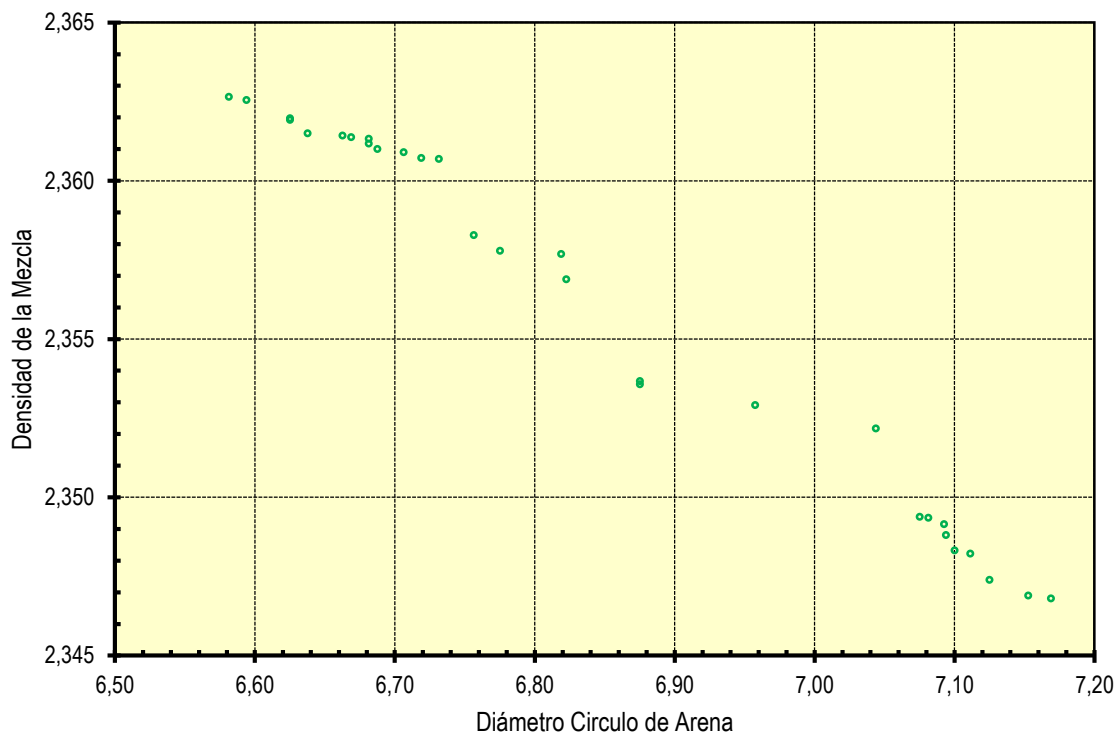
### 3.8 DISPERSIÓN DE PUNTOS

En la gráfica de dispersión de datos se debe ordenar la variable independiente (Diámetro C.a.) en el eje x o eje de abscisas, y la variable dependiente (Densidad, Estabilidad y Fluencia) en el eje y o eje de las ordenadas.

Al conjunto de puntos que se forman se lo llama nube de puntos.

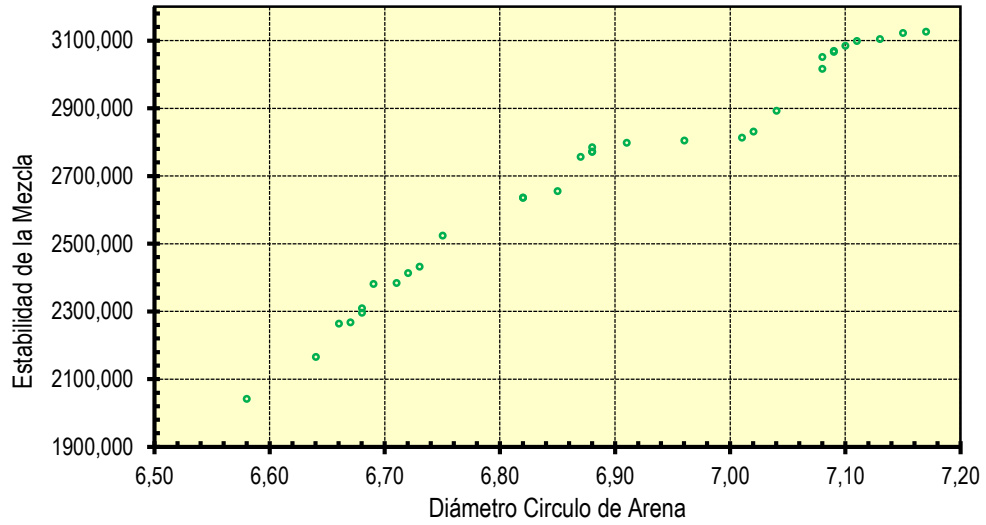
En la nube de puntos formada con los datos del Diámetro del Circulo de Arena (C.a.) y la Densidad se puede ver que tiene una pendiente negativa, lo que quiere decir que a medida que X es mayor, Y es menor. Lo que pasa al contrario con las gráficas del Diámetro de Circulo de Arena versus la Estabilidad y la Fluencia, que se muestran a continuación:

Figura 19. Dispersión De Puntos (Densidad)



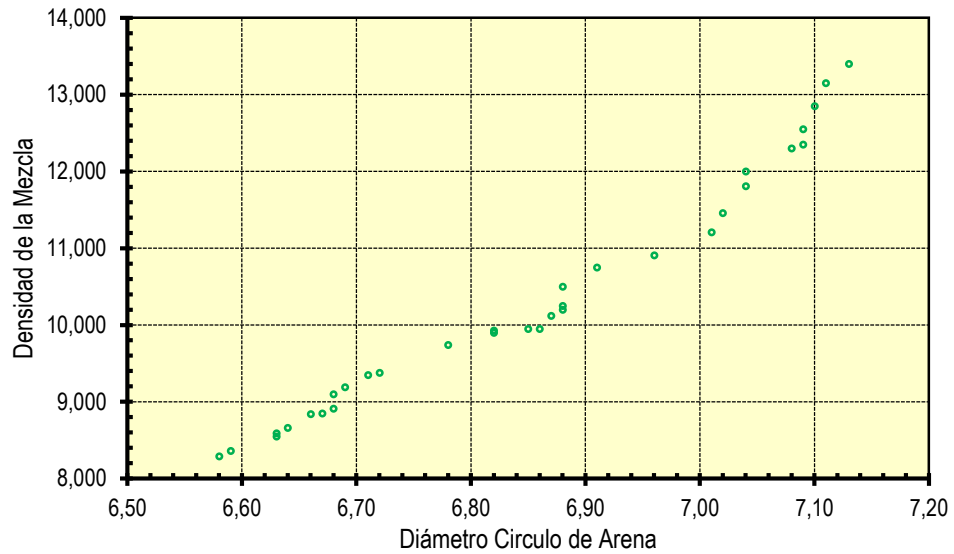
Fuente: Elaboración propia

Figura 20. Dispersión De Puntos (Estabilidad)



Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Dispersión De Puntos (Fluencia)



Fuente: Elaboración propia

### 3.9 ELECCIÓN DEL MODELO

Un modelo de regresión, es una manera de expresar dos ingredientes esenciales de una relación estadística:

- Una tendencia de la variable dependiente Y a variar conjuntamente con la variación de la o las X de una manera sistemática.
- Una dispersión de las observaciones alrededor de la curva de relación estadística.

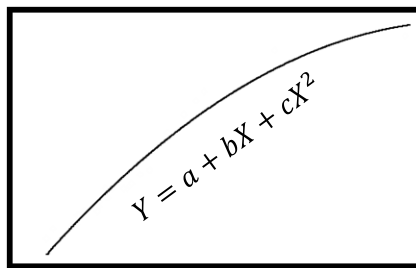
Estas dos características están implícitas en un modelo de regresión, postulando que:

- En la población de observaciones asociadas con el proceso que fue muestreado, hay una distribución de probabilidades de Y para cada nivel de X.
- Las medias de estas distribuciones varían de manera sistemática al variar X.

Suele suceder que al dibujar la nube de puntos correspondiente a  $n$  observaciones, se observa una tendencia no rectilínea, pero a la cual se le puede ajustar un modelo teórico conocido

Dentro de la familia de modelos, es de aplicación común el ajuste regresivo polinomial de grado  $S \ll S \geq 2 \gg$

Figura 22. Modelo Polinómico



Fuente: Statgraphics

Al fijarse en nuestra nube de puntos se puede notar que se debe realizar un ajuste no lineal.

Para nuestros datos se procede a realizar el ajuste a un modelo de regresión como es el polinómico, por medio del método de mínimos cuadrados, en donde la ecuación será la siguiente:

$$Y = a + bX + cX^2$$

De la aplicación del programa computacional STATGRAPHICS, tenemos los siguientes resultados:

Cuadro 27. Constantes De Las Ecuaciones Correlacionadas

Constante	Valores de las constantes de las ecuación		
	Densidad	Estabilidad	Fluencia
a	2,20311	-82700,4	374,762
b	0,0735402	23049,7	114,733
c	-0,00747228	-1545,38	8,97691

Fuente: Elaboración propia, Statgraphics

Las ecuaciones resultantes de la regresión polinómica se muestran en el cuadro a continuación:

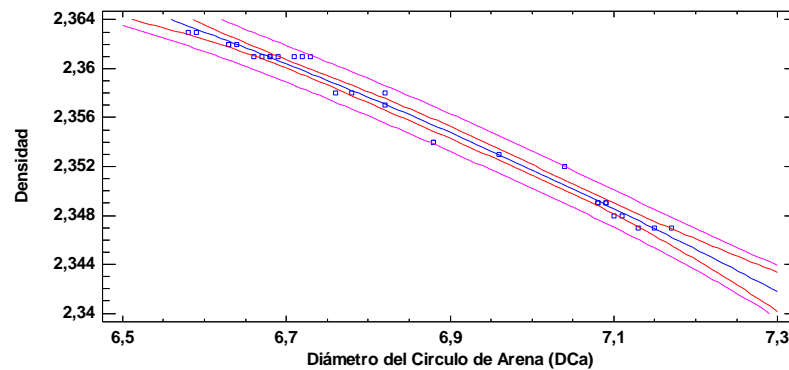
Cuadro 28. Ecuaciones Correlacionadas

PARAMETRO	ECUACIÓN
Densidad	$D = 2,20311 + 0,0735402*DCa - 0,00747228*DCa^2$
Estabilidad	$E = -82700,4 + 23049,7*DCa - 1545,38*DCa^2$
Fluencia	$F = 374,762 - 114,733*DCa + 8,97691*DCa^2$

Fuente: Elaboración propia, Statgraphics

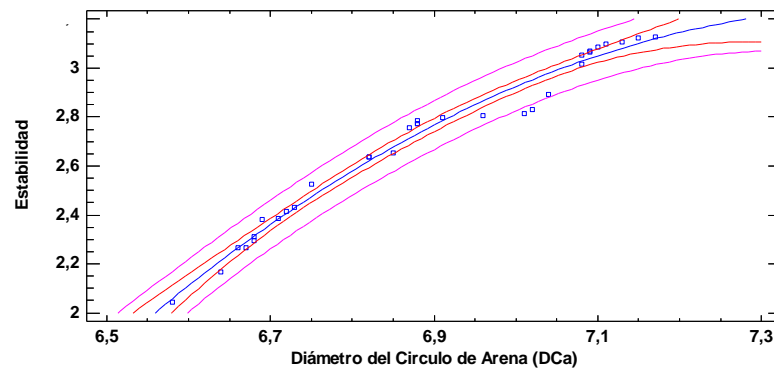
Para el tipo de información como es el del DCa versus D, E y F, se aplica este tipo de modelo:

Figura 23. Modelo De Regresión Ajustado (Densidad)



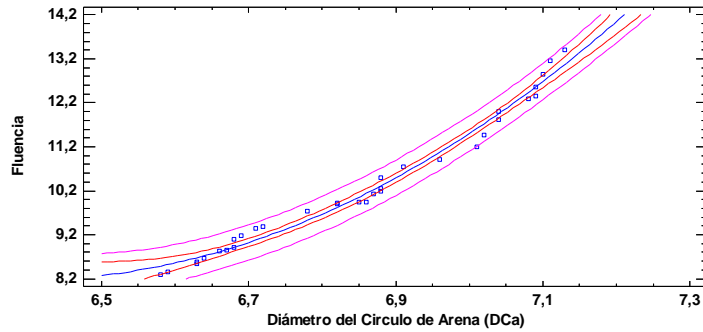
Fuente: Elaboración propia, Statgraphics

Figura 24. Modelo De Regresión Ajustado (Estabilidad)



Fuente: Elaboración propia, Statgraphics

Figura 25. Modelo De Regresión Ajustado (Fluencia)



Fuente: Elaboración propia, Statgraphics

### 3.10 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

Un análisis de correlación trata de establecer el grado de relación entre dos variables, decir trata de medir cuán dependiente es una variable de la otra.

Se asume que existe correlación entre dos variables, cuando es evidente que al variar una de ellas, también se produce variación de la otra.

#### 3.10.1 Coeficiente De Correlación

Es un número que varía entre -1 y +1, se usa para medir el grado de relación existente entre las variables.

PARAMETRO	r (%)
Densidad	99.32
Estabilidad	99.00
Fluencia	99.23

Lo que nos indica que la relación existente entre las variables es excelente, porque una correlación excelente esta entre 0.9 – 1.0.

#### 3.10.2 Coeficiente De Determinación

Es el cuadrado del coeficiente de correlación, es un número positivo que varía entre 0 y 1, permite indicar el grado de certeza con que una variable depende de la otra, este coeficiente multiplicado por 100 y redondeado, es la certeza de en qué porcentaje los valores de Y dependen de los valores de X.

Para nuestro estudio se tiene un coeficiente de determinación:

PARAMETRO	R <sup>2</sup> (Decimal)
Densidad	0.9865
Estabilidad	0.9802
Fluencia	0.9850

Que en porcentaje nos da:

PARAMETRO	R <sup>2</sup> (%)
Densidad	98.65
Estabilidad	98.02
Fluencia	98.50

Lo que nos indica que el valor Y (Densidad, Estabilidad y Fluencia) depende en un 98.65%, 98.02% y 98.50% respectivamente de la variable X (Diámetro del Circulo de Arena - DCa)

### 3.11 APLICACIÓN AL TRAMO TARIJA – EL VALLE

Se realizó la lectura de la macro textura de la superficie del pavimento asfaltico del tramo Cruce el Valle – El valle, se considera sólo este tramo debido a que este tramo y el tramo Tarija – Cruce el Valle fueron pavimentados en diferente tiempo, este segundo no fue pavimentado en una sola etapa, es decir, que se la realizó por partes. Debido a ello y considerando el tramo más largo pavimentado en una sola etapa, se considera la investigación y aplicación sólo para este tramo (Cruce el Valle – El valle).

Figura 26. Imagen Satelital Del Tramo De Aplicación



Fuente: Elaboración propia; Google earth

Mediante la metodología del Círculo de Arena (ASTM E 965, ver anexos) se realiza la lectura de la macro textura. La medición se realizó cada 200 metros en un total de carretera de 9,156 Km (ver figura anterior), contando con un promedio total de 45 mediciones en campo.

Con las lecturas realizadas en campo se aplican a las ecuaciones establecidas en esta ecuación que sólo son aplicables a este único tramo, pero se podría aplicar la metodología que se sigue en este documento para cualquier tipo y granulometría de agregados pétreos y establecer sus propias ecuaciones.

Reemplazando las lecturas promedio del círculo de arena (macro textura) se procede a la aplicación y cálculo de las características mecánicas de la mezcla; densidad, estabilidad y la fluencia:

Previamente antes de reemplazar las lecturas promedio de la macro textura se le hace un ajuste ya que en laboratorio se aplicó la metodología del círculo de arena a una escala diferente debido a la superficie es limitada de las briquetas, así de esta manera se utilizó 10 cm<sup>3</sup>, en cambio en campo se utilizó 50 cm<sup>3</sup> de arena. Debido a esto se corrige en un tanto de 1/5.

$$\frac{Lec. Campo}{5} = Lec. ajustada$$

Con el ajuste a las lecturas promedio de las realizadas en el tramo en cuestión se aplica las ecuaciones establecidas y con un simple cálculo de multiplicación y sumas se estiman los valores de la densidad, la estabilidad y a fluencia de la mezcla por consiguiente se tiene el siguiente cuadro, que se muestra a continuación con los valores de la lectura promedio inicial, la lectura ajustada y los valores de los resultados estimados tanto de la densidad, estabilidad, como así también de la fluencia.

Cuadro 29. Aplicación De Las Ecuaciones Correlacionales

Diámetro del Círculo de Arena		Propiedades mecánicas		
Lec. Prom.	Ajuste de entrada	Densidad 2-3 (gr/cm <sup>3</sup> )	Estabilidad >1500	Fluencia 8 - 18
33,1	6,6	2,362	2163,26	8,64
32,6	6,5	2,365	1888,92	8,31
32,5	6,5	2,366	1800,59	8,25
32,5	6,5	2,365	1830,35	8,27
32,6	6,5	2,365	1859,79	8,29
33,1	6,6	2,362	2163,26	8,64
32,5	6,5	2,365	1836,26	8,28
33,1	6,6	2,362	2163,26	8,64
32,5	6,5	2,365	1830,35	8,27
32,4	6,5	2,366	1794,61	8,25
33,1	6,6	2,362	2163,26	8,64
33,0	6,6	2,363	2110,87	8,56
34,8	7,0	2,353	2872,48	11,13
32,5	6,5	2,365	1830,35	8,27
32,7	6,5	2,364	1946,26	8,36
32,6	6,5	2,365	1888,92	8,31
32,7	6,5	2,364	1946,26	8,36
33,1	6,6	2,362	2163,26	8,64
32,3	6,5	2,366	1694,03	8,20
33,5	6,7	2,360	2360,48	9,02
33,1	6,6	2,362	2163,26	8,64
32,5	6,5	2,365	1830,35	8,27
32,6	6,5	2,365	1865,64	8,30
33,2	6,6	2,362	2227,02	8,75
34,4	6,9	2,356	2722,94	10,27
34,2	6,8	2,357	2658,02	9,98
34,0	6,8	2,358	2589,31	9,71
34,1	6,8	2,357	2619,22	9,82
34,5	6,9	2,355	2775,57	10,54
34,8	7,0	2,353	2872,48	11,13
33,8	6,8	2,359	2495,41	9,39
33,8	6,8	2,359	2473,70	9,32
33,6	6,7	2,360	2418,06	9,17
34,1	6,8	2,357	2629,04	9,86
33,2	6,6	2,362	2214,42	8,72
33,7	6,7	2,359	2462,72	9,29
32,4	6,5	2,366	1794,61	8,25
33,6	6,7	2,360	2406,70	9,14
33,6	6,7	2,360	2406,70	9,14
33,4	6,7	2,361	2300,98	8,89
32,9	6,6	2,363	2057,24	8,49
34,0	6,8	2,358	2558,71	9,60
33,3	6,7	2,361	2264,34	8,82
34,0	6,8	2,358	2579,19	9,67
33,3	6,7	2,361	2276,63	8,84

Fuente: Elaboración propia.

### 3.11.1 Comprobación De Resultados

A los resultados obtenidos en el cuadro anterior (aplicación de las ecuaciones de correlación establecidas mediante la presente investigación) el promedio de los resultados se ajusta dentro de los límites establecidos por la Metodología Marshall en las que la densidad optima se debe encontrar entre 2 y 3 gr/cm<sup>3</sup>, la estabilidad debe ser mayor que 1500 Lb y la fluencia debe encontrarse entre 8 – 18 (1/100”). Comprobando que las ecuaciones cumplen con el objetivo de hacer una verificación de las características de la mezcla empleada en el pavimentado del tramo que es objeto de esta investigación, así también, se cuenta con un Registro de “Resultados del Control Diario de la Producción de Mezcla Asfáltica para el Proyecto: CR.ER.F001 (Cruce Valle) – Concepción” (se encuentra este documento en anexos, A7) en la que se muestran los resultados de los ensayos de las briquetas elaboradas en base a la mezcla empleada en dicho pavimentado con la que se tiene el siguiente rango de resultados obtenidos a partir de los ensayos correspondiente:

<b>Límites de resultados</b>		
Valor:	Estabilidad	Fluencia
Mínimo	3440.6	16.54
Máximo	1792.6	8.07

Si comparamos estos valores límites (mínimo y máximo) obtenidos de los resultados de control diario del tramo en cuestión vemos que se encuadran dentro de los límites tanto de la estabilidad, como así también de la fluencia. De esta manera se comprueba la viabilidad de la aplicación de estas ecuaciones de correlación que se obtuvieron a través de esta investigación.

**CAPITULO VI**

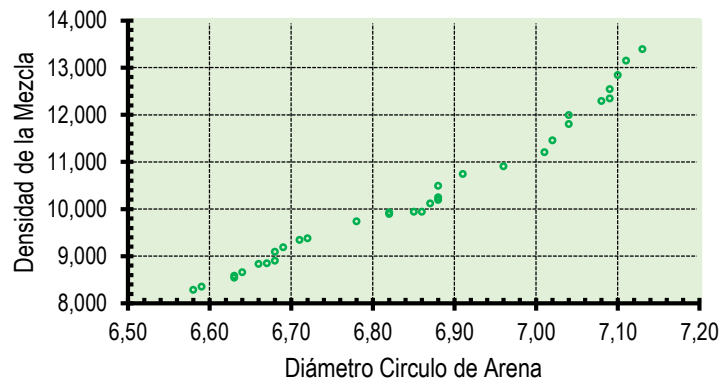
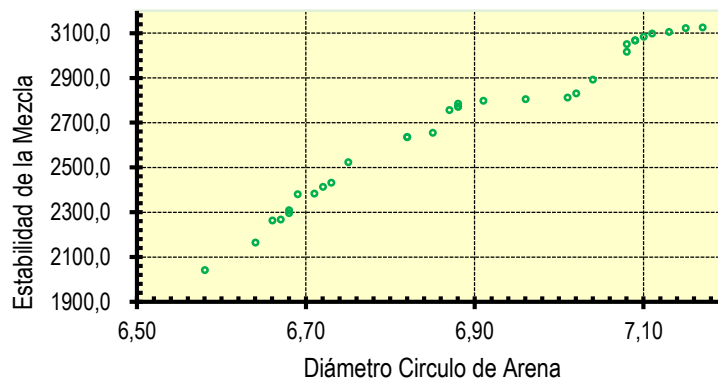
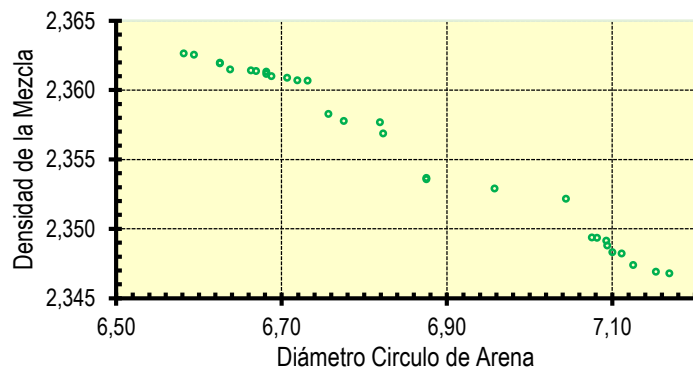
**CONCLUSIONES Y**

**RECOMENDACIONES**

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

- ❖ El ajuste de las lecturas realizadas a las briquetas (textura, densidad, estabilidad y fluencia) a una curva se encontró que la curva polinómica de segundo grado es la que mejor se ajusta a la nube de puntos graficados en un eje de coordenadas en la que el eje Y u ordenada (eje vertical) se encuentra la variable dependiente (Densidad, Estabilidad o Fluencia) y en el eje X o abscisa (eje horizontal) se encuentra la variable independiente (diámetro del círculo de arena, textura superficial).



Para mejorar el ajuste de los datos a la curva polinómica de segundo grado se hace una depuración de puntos, dichos puntos al encontrarse más alejados de la línea de tendencia hacen que quede fuera del 95 % que se espera, de tal manera éstos más dispersos son identificados y eliminados de la nube puntos haciendo que la correlación aumente permitiendo que su ajuste este dentro del límite mínimo del 95 % lo cual favoreció al ajuste de cada una de las ecuaciones ajustadas.

- ❖ Se comprueba la correlación que existe entre la textura superficial de los pavimento con las propiedades de la mezcla asfáltica de aplicación al tramo Tarija – El Valle. Se obtuvo un mejor ajuste a la curva del tipo polinómica de segundo grado, con la que se cuenta con coeficiente de correlación muy buenos (0.9 – 1), como se muestra en el cuadro siguiente:

<b>Coefficiente De Correlación</b>	
<b>PARAMETRO</b>	<b>r (%)</b>
Densidad	99.32
Estabilidad	99.00
Fluencia	99.23

- ❖ Se comprueba la aplicabilidad de las ecuaciones resultantes de la presente investigación (ecuaciones polinómicas de 2do grado), mediante la lectura previamente realizada en el tramo Tarija – El Valle (tramo de aplicación de la investigación) de la textura superficial mediante el Método del Circulo de Arena (ASTM E 965), dichas lecturas son ajustadas a una quinta parte (1/5), debido a la escala diferente a la que se trabajó en las briquetas de las cuales se obtienen estas ecuaciones. Con la lectura de la textura ajustada se procede al ingreso de la ecuación y se obtienen los resultados de la Densidad, Estabilidad y la Fluencia y se puede apreciar que se encuentran dentro de los límites establecidos en las especificaciones de la metodología Marshall (Densidad = 2-3 gr/cm<sup>3</sup>; Estabilidad > 1500 Lb; Fluencia = 8 – 18 1/100in) y como así también, dentro de los límites de los resultados del control diario de la producción de la mezcla durante el pavimentado (Ver anexo A7)

<b>Límites-Control diario producción de la mezcla durante el pavimentado</b>		
<b>Valor:</b>	<b>Estabilidad</b>	<b>Fluencia</b>
Mínimo	3440.6	16.54
Máximo	1792.6	8.07

En tanto para los objetivos específicos se tiene:

- ❖ Se estableció una gradación de material granular (grava, gravilla y arena) bajo las especificaciones de diseño Marshall por tanteo.
- ❖ De la toma de muestra del material granular, se logró realizar la caracterización y el trabajo de investigación de manera que se logró estimar que el mismo contaba con las especificaciones mínimas y máximas requeridas para su uso en la investigación basados en la información levantada y normas existentes.
- ❖ Se realizaron con éxito todos los ensayos correspondientes al cemento asfáltico que se empleó en este estudio de investigación. El cemento asfáltico utilizado es del tipo 85-100 y proveniente de Brasil.
- ❖ La aplicó la metodología Marshall para el diseño de mezclas asfálticas, llegando a encontrar un contenido óptimo de cemento asfáltico, para satisfacer las especificaciones requeridas utilizando el agregado seleccionada (material chancado, San José de Charaja)
- ❖ Se realizaron briquetas a partir del diseño establecido bajo la metodología Marshall, para posteriormente determinar sus características físicas, tales como la textura, densidad, estabilidad y fluencia. La textura se la realizó de acuerdo a la norma ASTM D 965 Método para Determinar la Textura Superficial del Pavimento Mediante el Círculo de Arena y la determinación de las propiedades como la densidad, estabilidad y la fluencia se las realizó bajo la norma de manuales técnicos “Volumen 4: Ensayo de Suelos y Materiales”. La densidad bajo la norma A0606 Método para Determina la Densidad Real de Mezclas Compactadas; La estabilidad y la Fluencia bajo la norma A0608 Método para Determinar la Resistencia a la Deformación Plástica de Mezclas Asfálticas Utilizando el Aparato Marshall.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- ❖ El presente trabajo de investigación se aplica únicamente al tramo correspondiente (carretera Tarija – El Valle de Concepción), ya que se consideran tanto los materiales pétreos como el ligante asfáltico del mismo banco, es decir, que todos los componentes provienen de la chancadora San José de Charaja en la que también se encuentra el depósito del cemento asfáltico empleado en dicho pavimento.
- ❖ La aplicación de las ecuaciones generadas en esta investigación son únicamente aplicables a dicho tramo, por lo motivos señalados anteriormente y dicha aplicación es restringida a un cierto periodo de tiempo, que podrían ser entre 3 – 5 años e incluso tal vez un poco más, mucho dependerá de las cargas de tráfico a la que ésta se someta, a los agentes atmosféricos, etcétera que podrían dañar la su estructura y por consiguiente alterar sus características mecánicas y textura superficial.
- ❖ Por otra parte para la aplicabilidad de estas ecuaciones se debe seguir con las especificaciones de la metodología del Círculo de Arena, es decir, a momento de las mediciones del diámetro del círculo de arena, basándose estrictamente en dicho método.

Por otro parte se tiene las siguientes recomendaciones de seguridad durante la elaboración de mezclas asfálticas.

- ❖ Realizar una buena recolección de información para que el tema de investigación se encuentre sustentado.
- ❖ Asegurarse de realizar el muestreo tanto el agregado grueso y fino, el cemento asfáltico cumpliendo las especificaciones según la metodología correspondiente (ver anexo A2).
- ❖ Usar la protección necesaria para realizar los trabajos con mezclas asfálticas en caliente por las temperaturas que se trabaja.
- ❖ Para obtener buenos resultados en el acabado superficial se debe hacer un control en el compactado de las mezclas, que éste sea uniforme en todo el pavimento.

