

ANÁLISIS DEL CONTACTO AGREGADO-AGREGADO EN MEZCLAS DRENANTES EMPLEANDO TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA CON RAYOS-X

CAP. I INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Investigaciones desarrolladas en el extranjero, han diseñado nuevas capas de rodadura con mezclas asfálticas, que evitan el hidroplaneo al usuario de la carretera. Esta nueva estructura es una carpeta drenante o porosa, cuyo porcentaje de vacíos es mayor que el de un concreto asfáltico denso. Además de la ventaja ya mencionada, también disminuye el ruido causado por el rodaje de los vehículos sobre la carpeta, (LINARES F., et al., 2010).

Según (ALVAREZ LUGO, et al., 2008), la tomografía computarizada con rayos – X (X-ray CT) es un método eficaz para caracterizar la estructura interna de materiales porosos. Su empleo ha sido especialmente eficiente en el estudio de la microestructura de mezclas asfálticas, en particular en lo concerniente a la determinación de la estructura de vacíos (i.e., tamaño, distribución y conectividad) y al análisis de transporte de agua al interior del material. La principal ventaja de esta técnica es que, al ser no destructiva, es posible utilizar los mismos especímenes en pruebas de laboratorio posteriores con el fin de determinar sus características mecánicas, físicas, o químicas.

La TC-RX es una técnica funcional para la evaluación de la estructura interna de MA con múltiples aplicaciones útiles para el mejoramiento de la caracterización de estos materiales de pavimentación, (ÁLVAREZ, et al., 2013).

El protocolo de fabricación en laboratorio de especímenes compactados de MA es susceptible de modificaciones tendientes a mejorar la representatividad y confiabilidad de los ensayos de desempeño aplicados a éstos. En particular, se recomienda cortar las porciones externas (i.e., 15 a 20 mm en la parte superior e inferior) de los especímenes, (ÁLVAREZ, et al., 2013).

La evaluación realizada por (ÁLVAREZ, et al., 2013) sustenta que el número de puntos de contacto de los agregados en las MD evaluadas se incrementa al elevarse el número de partículas de agregado en función de la granulometría del agregado. Adicionalmente, al decrecer el contenido de vacíos se reportó un incremento del número de puntos de contacto. Estos resultados

sugieren la posibilidad de optimizar a futuro la respuesta mecánica de las MD, maximizando el número de puntos de contacto, en función de un análisis más detallado de la granulometría de las mezclas. Adicionalmente, los resultados enfatizan la necesidad de controlar en campo el contenido de vacíos actualmente evaluado en muchos casos mediante inspección visual para garantizar indirectamente el mayor número de puntos de contacto posible y de esta forma asegurar una adecuada resistencia a la desintegración en las MD.

1.2 Justificación

Esta investigación pretende principalmente dar un aporte, que permita el interés en la realización de más investigaciones en cuanto a mezclas asfálticas drenantes, ya que su utilización ha demostrado en distintas experiencias un importante número de ventajas sobre las mezclas densas, sin embargo dado los problemas habituales en los pavimentos de nuestro país sobre todo en época de lluvia, como inundaciones, accidentes, causados por el agua acumulada en la superficie del pavimento, vale la pena comenzar a establecer un diseño de esta mezcla utilizando materiales (agregados y asfalto) comerciales en nuestro país para verificar las bondades que estas mezclas pueden aportar al mejoramiento de nuestros pavimentos, si bien es cierto que en esta investigación únicamente se llevara a cabo el análisis de contacto agregado-agregado empleando tomografía computarizada con rayos-X de la mezcla drenante, representa un inicio importante en la introducción de estas en nuestro país.

Al utilizar tomografía computarizada con rayos-X, ofrece ventajas principalmente debido a su carácter no destructivo, la rapidez de los ensayos, la facilidad de uso y la confiabilidad de los resultados.

En nuestro medio se cuenta con zonas de baja pendiente y con altas precipitaciones, donde se tiene dificultades en poder drenar el agua de una manera eficiente, es por eso, que realizar estudios sobre la aplicación de mezclas drenantes en pavimentos es de suma importancia.

Al diseñar un pavimento flexible con la cualidad que sea drenante, se le está brindando al conductor una mayor seguridad al conducir, con ello se está evitando los accidentes automovilísticos causados por el hidropneumático durante las lluvias. Cuando la estructura es drenante se proporciona mayor adherencia llanta-pavimento, tanto en estado seco como húmedo.

Estas mezclas representan una opción nueva de capa de rodadura para pavimentos, estudiarlas y aprender de su comportamiento desde el momento de la selección de su granulometría para establecer el diseño de la mezcla es necesario, la información que ello brinde facilitará la investigación a los entes gubernamentales, ingenieros civiles, técnicos en pavimentos y demás instituciones, cuyas actividades involucren las mezclas asfálticas drenantes ya sea en

construcción, diseño o simplemente gestión, también a los que se encuentren comprometidos con la seguridad de los usuarios.

1.3 Diseño Teórico

1.3.1 Planteamiento del Problema

1.3.1.1 Situación Problemática

Las carreteras de mezcla asfáltica en nuestro medio se diseñan con pendiente transversal para drenar el agua hacia la respectiva cuneta, sin embargo durante lluvias intensas o de larga duración, esta pendiente transversal no llega a ser suficiente para drenar el agua hacia las cunetas produciendo una película de agua sobre el pavimento que al filtrarse en este debilita su estructura.

Cuando un vehículo circula sobre un pavimento en el estado antes mencionado se produce una separación entre el neumático y el pavimento, fenómeno conocido como hidroplaneo o aquaplaning, de igual forma se hace presente la reflexión de la luz que produce el agua sobre la superficie durante la noche, afectando la visión del conductor.

Esto ha llevado a que se realicen innumerables investigaciones en diferentes países proponiendo como una solución, el uso de mezclas drenantes o porosas, las cuales proporcionan un mejor drenaje del agua a través de la capa de rodadura y no por sobre la misma, significa que debe diseñarse la granulometría que se ajuste a lo requerido por las mezclas drenantes de acuerdo a las características propias de los agregados disponibles en nuestro medio e investigar el comportamiento de los asfaltos en estas mezclas.

Por lo que se ve necesario poder realizar estudios sobre el contacto agregado – agregado de mezclas drenantes basado en imágenes adquiridas mediante tomografía computarizada con rayos –X (TC-RX) para cuantificar el número y distribución de los puntos de contacto agregado – agregado y de esta manera garantizar buenos resultados de las mezclas drenantes.

1.3.1.2 Formulación del Problema

Ante la necesidad de contar con una información útil sobre mezclas asfálticas drenantes, se ve preciso poder realizar estudios sobre el contacto agregado–agregado basado en imágenes adquiridas mediante tomografía computarizada con rayos –X (TC-RX), y de esta manera garantizar buenos resultados que mejoren la seguridad del usuario.

1.3.2 Objetivos

1.3.2.1 Objetivo General

Analizar el contacto agregado – agregado en mezclas drenantes empleando Tomografía Computarizada con Rayos – X.

1.3.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar el contenido óptimo de asfalto para mezclas drenantes.
- Cuantificar el número y distribución del número de puntos de contacto agregado-agregado en la estructura interna de mezclas drenantes basado en imágenes adquiridas mediante tomografía computarizada con rayos-X (TC-RX).
- Dar a conocer las ventajas y desventajas que posee una mezcla drenante.
- Determinar la relación del número de puntos de contacto y el número de partículas de agregado cuantificadas en las diferentes secciones transversales.
- Determinar el contenido total de vacíos de los especímenes empleando imágenes binarias.
- Determinar la relación del contenido de vacíos y el número de puntos de contacto.
- Evaluar la resistencia a la desintegración de mezclas drenantes empleando el ensayo Cántabro.
- Valoración de la metodología planteada para el análisis de mezclas drenantes con tomografía computarizada con rayos X.

1.3.3 Hipótesis

Si el análisis del contacto agregado – agregado en mezclas drenantes puede llevarse a cabo por medio de tomografía computarizada con rayos X, entonces se pueden evaluar las propiedades de la mezcla de manera efectiva.

1.3.4 Variables

Variables independientes: puntos de contacto agregado-agregado, contenido total de vacíos y número de partículas, distribución vertical del número de puntos, parámetros de resultados del ensayo Cántabro.

Variable dependiente: comportamiento de la estructura interna de mezclas drenantes basado en imágenes adquiridas mediante tomografía computarizada con rayos-X (TC-RX).

1.3.5 Alcance

Este trabajo tiene por alcance mostrar los conceptos básicos de pavimento, asfalto y mezcla asfáltica, las propiedades fundamentales del asfalto, las características que presenta una mezcla asfáltica drenante, se definirán los tipos de mezclas asfálticas y las metodologías de diseño desarrolladas en diferentes países extranjeros y también se realizará una explicación del método Cántabro, utilizado por ser el de mayor aplicación y, a la vez, por su sencillez al utilizar la máquina de Los Ángeles para medir el desempeño de la mezcla en base a la disgregación de la mezcla, asimismo con la definición, descripción y utilización en ingeniería de Tomografía Computarizada con Rayos-X.

Se realizará la preparación y fabricación de las briquetas en laboratorio utilizando la metodología de diseño seleccionada, densidad y análisis de huecos mediante imágenes digitales obtenidas a partir de Tomografía Computarizada en Rayos-x, cada imagen digital empleada corresponderá a una representación bidimensional de la sección transversal en escala de grises para cada briqueta, también este trabajo contemplará los resultados e interpretación de las pruebas realizadas a las briquetas.

Con ello se pretende dar difusión a esta mezcla asfáltica, para que sea ampliamente conocido por Ingenieros, Arquitectos y Técnicos de la construcción. Quedando abierta la posibilidad para posibles líneas de investigación.

El primer capítulo inicia con una reseña histórica acerca del pavimento asfáltico drenante utilizado en países extranjeros. Luego se da a conocer el planteamiento del problema así como el motivo por el cual se ha realizado la investigación (su justificación), además se mencionan los objetivos que se pretenden alcanzar al finalizar su desarrollo.

En el segundo capítulo se expone los conceptos básicos de pavimento, asfalto y mezcla asfáltica, las propiedades fundamentales del asfalto, las características que presenta una mezcla asfáltica drenante, se definen los tipos de mezclas asfálticas y las metodologías de diseño desarrolladas en diferentes países extranjeros y también se realizara una explicación del método Cántabro, utilizado por ser el de mayor aplicación y, a la vez, por su sencillez al utilizar la máquina de Los Ángeles para medir el desempeño de la mezcla en base a la disgregación de la mezcla. Finalizando con la definición, descripción y utilización en ingeniería de Tomografía Computarizada con Rayos-x.

En el tercer capítulo corresponde a la preparación y fabricación de las briquetas en laboratorio utilizando la metodología de diseño seleccionada, densidad y análisis de huecos mediante imágenes digitales obtenidas a partir de Tomografía Computarizada en Rayos-x en cada briqueta, también contempla la recolección y procesamiento de datos, se analizara los datos que son un precedente para la actividad de interpretación, la interpretación se realizara en términos de los resultados de la investigación.

En el cuarto capítulo se dan las conclusiones concernientes al presente documento y las recomendaciones de aspectos importantes.

1.4 Diseño Metodológico

1.4.1 Población

La población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones, podemos decir que la población es la totalidad del fenómeno a estudiar, en donde las unidades de población posee una característica común la cual estudia y da origen a los datos. (Sampieri, 1997)

La totalidad del fenómeno a estudiar en esta investigación son las mezclas asfálticas drenantes utilizadas en pavimentos flexibles.

1.4.2 Muestra

La muestra se define como un subgrupo de la población. Para delimitar las características de la población. (Sampieri, 1997)

Según Acevedo (1984) define la muestra como "una Población o sea, un número de individuos, un objeto de los cuales es un elemento del universo o población, es decir, un conjunto de la población con la que se está trabajando".

La muestra para realizar los ensayos de laboratorio y la tomografía computarizada en rayos-x será de 30 briquetas de mezcla asfáltica drenante, que será diseñada con porcentajes de vacíos del 17%, 20% y 23%.

1.4.3 Procesos y Medios

La recolección de datos para el diseño de la mezcla asfáltica drenante se los realiza de acuerdo a las normas ASTM, AASHTO y ABC.

La información se tomara de los ensayos realizados en laboratorios para:

- Cuantificar el número y distribución del número de puntos de contacto agregado-agregado en la estructura interna
- Determinar la relación del número de puntos de contacto y el número de partículas de agregado cuantificadas en las diferentes secciones transversales.
- Determinar el contenido total de vacíos de los especímenes empleando imágenes binarias.
- Determinar la relación del contenido de vacíos y el número de puntos de contacto.
- Evaluar la resistencia a la desintegración de mezclas drenantes empleando el ensayo Cántabro.

Los instrumentos utilizados para la realización de estas técnicas fueron:

- Equipo de laboratorio de suelo y asfalto.
- Tomógrafo computarizado con rayos-X
- Equipos de oficina.
- Manuales y Especificaciones de diseños de mezclas asfálticas drenantes.

1.4.4 Procesamiento Estadístico

Una vez concluidas las etapas de recolección y procesamiento de datos se iniciara con una de las más importantes fases de una investigación, el análisis de datos. En esta etapa se determina como analizar los datos y que herramientas de análisis estadístico son adecuadas para éste propósito. El análisis de datos es el precedente para la actividad de interpretación. La interpretación se realiza en términos de los resultados de la investigación. Esta actividad consiste en establecer inferencias sobre las relaciones entre las variables estudiadas para extraer conclusiones y recomendaciones (Kerlinger, 1982). La interpretación se realiza en dos etapas:

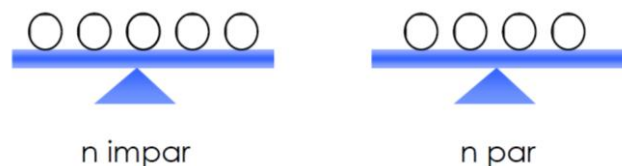
- Interpretación de las relaciones entre las variables y los datos que las sustentan con fundamento en algún nivel de significancia estadística.
- Establecer un significado más amplio de la investigación, es decir, determinar el grado de generalización de los resultados de la investigación.

Las dos anteriores etapas se sustentan en el grado de validez y confiabilidad de la investigación, ello implica la capacidad de generalización de los resultados obtenidos.

Según (Sampieri, 1997) las medidas de tendencia central son puntos en una distribución, los valores medios o centrales de ésta y nos ayudan a ubicarla dentro de la escala de medición. Las principales medidas de tendencia central son tres: moda, mediana y media. El nivel de medición de la variable determina cuál es la medida de tendencia central apropiada.

La moda es la categoría o puntuación que ocurre con mayor frecuencia.

La mediana. es el valor que divide a la distribución por la mitad. Esto es, la mitad de los que caen por debajo de la mediana y la otra mitad se ubica por encima de la mediana. La mediana refleja la posición intermedia de la distribución.



La mediana es el dato que se encuentra exactamente a la mitad de la muestra ordenada, esto se puede entender una balanza que contiene los datos; para que este equilibrada debe existir el mismo número de datos de cada lado por lo que la mediana será la que quede situada en el centro de la balanza.

La media es la medida de tendencia central más utilizada y puede definirse como el promedio aritmético de una distribución. Se simboliza como: \bar{X} , y es la suma de todos los valores dividida por el número de casos, su fórmula es:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_k}{N} \quad \text{Ecuación 1-1}$$

La fórmula simplificada de la media es:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \text{Ecuación 1-2}$$

Fórmula, para el cálculo de la media con datos agrupados de una distribución de frecuencias:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k F_i * T_i}{n} = \sum_{i=1}^k F_i * T_i \quad \text{Ecuación 1-3}$$

Donde:

F_i = es la frecuencia de la i-esima clase

T_i = es la marca de clase de la i-esima clase

F'_i = es la frecuencia relativa de la i-esima clase

K = representa el total de clases de la distribución

Las medidas de la variabilidad nos indican la dispersión de los datos en la escala de medición, responden a la pregunta: ¿en dónde están diseminadas las puntuaciones o valores obtenidos?

Las medidas de tendencia central son valores en una distribución y las medidas de la variabilidad son intervalos, designan distancias o un número de unidades en la escala de medición. Las medidas de la variabilidad más utilizadas son el rango, la desviación estándar y la varianza.

Varianza

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} X^2 - \bar{X}^2 \quad \text{Ecuación 1-4}$$

El rango es la diferencia entre la puntuación mayor y la puntuación menor, indica el número de unidades en la escala de medición necesaria para incluir los valores máximo y mínimo.

La desviación estándar es el promedio de desviación de las puntuaciones con respecto a la media.

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

Ecuación 1-5

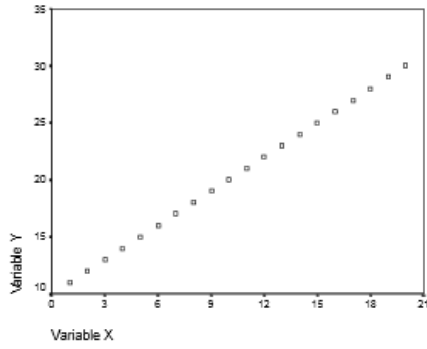
Correlación

El análisis de correlación trata de establecer el grado de relación entre dos variables es decir se trata de medir cuan dependiente es una variable de la otra.

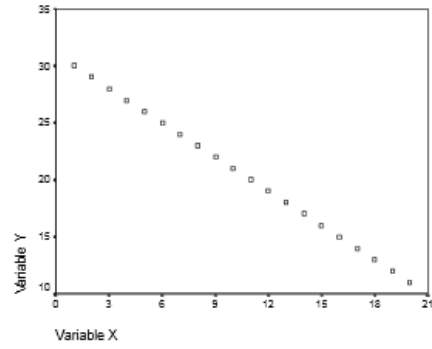
Cuando se trata de la relación entre dos variables, se llama correlación simple. A la relación entre tres o más variables se llama correlación múltiple.

Cuando la relación entre dos variables se la representa por una recta se llama correlación lineal. Si la relación se la representa por una curva cualquiera, se tiene la correlación no lineal.

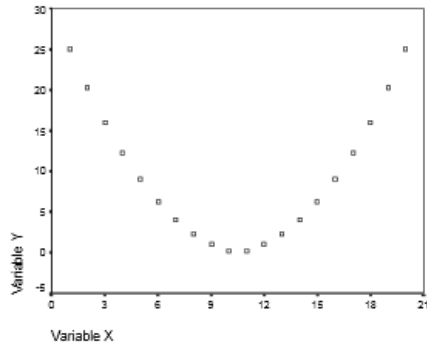
La figura 1.a muestra una situación en la que cuanto mayores son las puntuaciones en una de las variables, mayores son también las puntuaciones en la otra; cuando ocurre esto, los puntos se sitúan en una línea recta ascendente y hablamos de relación lineal positiva. La figura 1.b representa una situación en la que cuantos mayores son las puntuaciones en una de las variables, menores son las puntuaciones en la otra; en este caso, los puntos se sitúan en una línea recta descendente y hablamos de relación lineal negativa. En la situación representada en la figura 1.c también existe una pauta de variación clara, pero no es lineal: los puntos no dibujan una línea recta. Y en la figura 1.d no parece existir ninguna pauta de variación clara, lo cual queda reflejado en una nube de puntos dispersa, muy lejos de lo que podría ser una línea recta



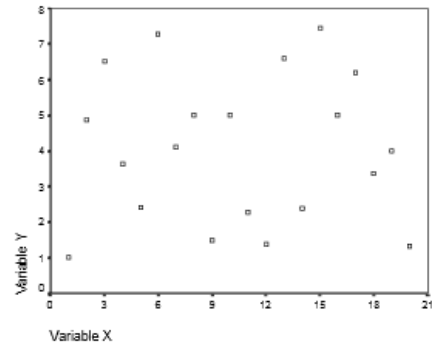
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1-1 Diagramas de dispersión expresando diferentes tipos de relación

Vemos, pues, que un diagrama de dispersión nos permite formarnos una idea bastante aproximada sobre el tipo de relación existente entre dos variables. Pero, además, observando los diagramas de la figura 17.1, podemos ver que un diagrama de dispersión también puede utilizarse como una forma de cuantificar el grado de relación lineal existente entre dos variables: basta con observar el grado en el que la nube de puntos se ajusta a una línea recta.

CAP. II ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE MEZCLAS DRENANTES Y SU EVALUACIÓN DEL CONTACTO AGREGADO-AGREGADO POR RAYOS-X.

1.1 Desarrollo de Conceptos Básicos de Pavimentos Flexibles¹

1.1.1 Definición de Pavimento

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas producidas por el tránsito y las transmiten a los estratos inferiores de manera distribuida, proporcionando una superficie de rodamiento que debe trabajar eficazmente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia que controle las cargas para evitar el agrietamiento, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aún en condiciones húmedas. Deberá presentar una resistencia adecuada a los efectos abrasivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas.

Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en las terracerías; además, que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza y consecuentemente más económicos. La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, cuando se determina el espesor de una capa el objetivo es darle el grosor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior. La resistencia de las diferentes capas dependerá del material que la constituye y el procedimiento constructivo; dos factores importantes son la compactación y la humedad, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas de tráfico, produciendo deformaciones permanentes.

1.1.2 Tipos de Pavimento

Básicamente existen dos tipos de pavimentos:

- Rígidos.

¹ Trabajo de graduación “Diseño de Mezcla Asfáltica Semicaliente Drenante en el Salvador” Linares Lesser, Moran Rebeca, Peñate Raúl

- Flexibles.

1.1.2.1 Pavimento Rígido

El pavimento rígido se compone de losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial más elevado que el flexible; el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa (comúnmente) en las juntas de las losas (ver figura 2-1).

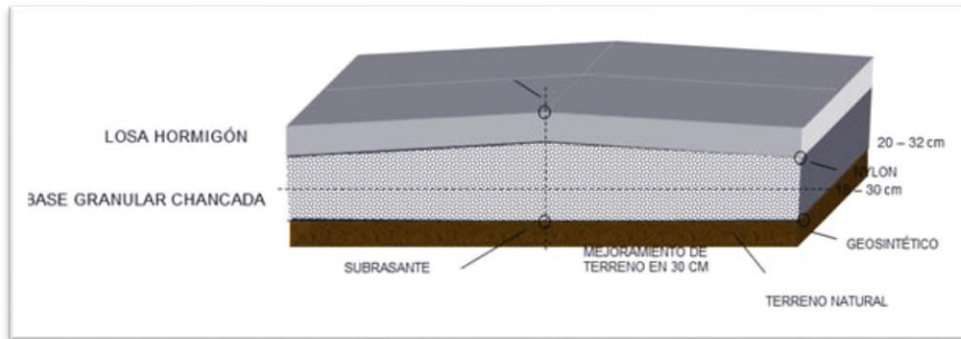


Figura N° 1-1 Pavimento Rígido (Hormigón)²

1.1.2.2 Pavimento Flexible

El pavimento flexible resulta más económico en su construcción inicial, pero tienen la desventaja de requerir mantenimiento constante. Este tipo de pavimento está compuesto principalmente de una carpeta asfáltica, de la base y de la sub-base (ver figura 2-2).

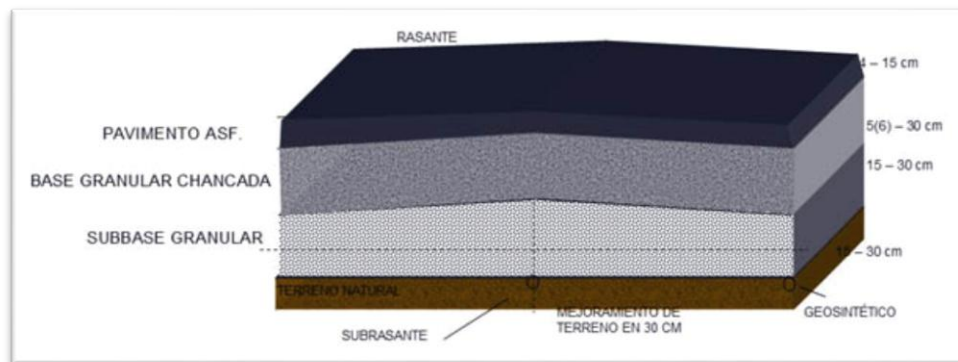


Figura N° 1-2 Pavimento Flexible (Asfalto)³

² http://www7.uc.cl/sw_educ/construccion/urbanizacion/html/conceptos/9.html

³ http://www7.uc.cl/sw_educ/construccion/urbanizacion/html/conceptos/8.html

1.2 Conceptos Básicos de Asfalto

1.2.1 Definición de Asfalto

Según el (INSTITUTE, 1989) el asfalto es un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido principalmente por betunes que pueden ser naturales u obtenidos por refinación del petróleo. El asfalto se presenta en proporciones variables en la mayoría de los petróleos crudos. En base a la proporción de asfalto, los petróleos se clasifican en:

- Petróleos crudos de base asfáltica: contiene alta proporción de bitumen.
- Petróleos crudos de base parafínica: contiene altos porcentajes de parafina, y no son aptos para obtener asfaltos.
- Petróleos crudos de base mixta: contiene parafina y asfalto.

El petróleo crudo, extraído de los pozos, es separado en sus constituyentes o fracciones en una refinería. Principalmente esta separación es llevada a cabo por destilación. Después de la separación, los constituyentes son refinados más cuidadosamente o procesados en productos que cumplan requerimientos específicos. De esta manera el asfalto, parafina, nafta, aceites lubricantes y otros productos útiles de alta calidad se obtienen en una refinería de petróleo, dependiendo de la naturaleza del crudo que está siendo procesado.

El petróleo crudo, extraído de los pozos, es separado en sus constituyentes o fracciones en una refinería. Principalmente esta separación es llevada a cabo por destilación. Después de la separación, los constituyentes son refinados más cuidadosamente o procesados en productos que cumplan requerimientos específicos. De esta manera el asfalto, parafina, nafta, aceites lubricantes y otros productos útiles de alta calidad se obtienen en una refinería de petróleo, dependiendo de la naturaleza del crudo que está siendo procesado.

Debido a que el asfalto es el constituyente más pesado del petróleo crudo, no se evapora o hierve cuando es destilado. Por lo tanto, el asfalto es obtenido como producto residual, y es valioso para una gran variedad de usos de obras ingenieriles y arquitectónicas.

El asfalto de petróleo para uso en pavimentos es comúnmente llamado asfalto de pavimentación o cemento asfáltico para distinguirlo del asfalto hecho para otros usos, como ser con propósitos industriales o techumbres.

El asfalto para pavimentación a temperatura atmosférica normal (ambiente) es un material negro, adherente, semi-sólido y altamente viscoso. Está compuesto primordialmente de moléculas complejas de hidrocarburos, pero también contiene otros átomos de elementos, como por ejemplo: oxígeno, nitrógeno y azufre (sulfuros). Debido a que el asfalto de pavimentación es pegajoso, se adhiere a las partículas del agregado y puede ser usado para cementarlas, aglomerarlas o ligarlas dentro del concreto asfáltico. El asfalto para pavimentación es impermeable y no lo afecta la mayoría de los ácidos, álcalis y sales. Es llamado un material termoplástico porque se ablanda cuando es calentado y se endurece cuando se enfría. Esta combinación única de características y propiedades es una razón fundamental para que el asfalto sea un material de pavimentación importante.

Las características visco elásticas del asfalto que cementa los agregados en la superficie de rodadura, generan una micro deformación al paso de las cargas, la cual recupera su posición original cuando las cargas desaparecen. Es por esto que se le denomina flexible a los pavimentos hechos con mezclas asfálticas.

1.2.2 Propiedades Físicas del Asfalto

Según (LINARES F., et al., 2010) Al integrar el cambio del abastecimiento de crudo de las refinerías se crearon más variaciones en las propiedades del asfalto, tanto físicas como químicas. De estas variaciones, surgió la necesidad de poder evaluar el comportamiento del asfalto ante condiciones particulares y predecir su rendimiento por medio de sus propiedades geológicas. Aun así, algunas propiedades físicas y químicas siguen siendo constantes en todos los tipos de asfaltos.

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción, y mantenimiento de carreteras son: adhesión, cohesión, susceptibilidad a la temperatura y durabilidad.

1.2.2.1 Adhesión y Cohesión

Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado, en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente las partículas de agregado en el pavimento terminado.

El ligante bituminoso debe ser capaz de envolver a los áridos, dar cohesión a la mezcla y resistir la acción de desmenuamiento del agua (Figura 2-3), tal efecto produce una separación del ligante con el árido disminuye así la cohesión de la mezcla.



Figura Nº 1-3 Acción de desmenuamiento del agua

1.2.2.2 Durabilidad

Durabilidad es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto.

Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la durabilidad del asfalto. Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para la durabilidad del asfalto.

Estas son la Prueba de Película Delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO).

1.2.3 Propiedades Químicas del Asfalto

El asfalto tiene propiedades químicas únicas que lo hacen muy versátil como material de construcción de carreteras.

Básicamente, el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno; casi en su totalidad solubles en sulfuro de carbono. El asfalto, cuando es disuelto en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfáltenos y máltenos. (Ver Figura 2-4).

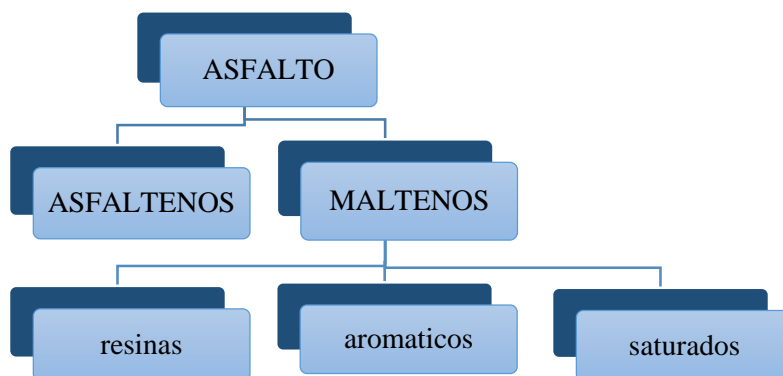


Figura Nº 1-4 Composición del asfalto

- a) **Los asfáltenos**, son compuestos químicos orgánicos y representan los compuestos más pesados y por tanto de mayor punto de ebullición. Una vez separados de los máltenos, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de grafito. Los asfáltenos le dan al asfalto su color y dureza y se encuentran disueltos en los máltenos, es decir es la fase discontinua del asfalto.
- b) **Los máltenos**, son líquidos viscosos formando la fase continua del asfalto. Su contenido se asocia a las propiedades mecánicas mostradas por el asfalto. Generalmente, existe mayor proporción de máltenos que de asfáltenos en los asfaltos. El mayor contenido de máltenos y su naturaleza química son las que le dan la calidad a un asfalto. Los máltenos se subdividen en:
 - Resinas: moléculas intermediarias en el asfalto, proporcionan las cualidades adhesivas (pegajosidad) en el asfalto. Son sólidos o semisólidos de color negro.

- Aromáticos: son líquidos viscosos de color negruzco e influye en la facilidad que tiene un asfalto para “admitir” polímeros modificadores. Los aromáticos constituyen de un 40% al 65% el total del asfalto.
- Saturados: son aceites viscosos de coloración amarillenta, en el cual flotan como islas los máltenos y asfáltenos.

Describiendo la estructura del coloide, las resinas circundan en forma inmediata a los asfáltenos y los aceites rodean a ese compuesto (ver figura 2-5)



Figura Nº 1-5 Estructura coloidal del asfalto⁴

La proporción de asfáltenos y máltenos en el asfalto puede variar debido a un sin número de factores, incluyendo altas temperaturas, exposición a la luz y al oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla del pavimento, y espesor de la película de asfalto en las partículas de agregado.

1.2.4 Sistemas de Clasificación del Cemento Asfáltico⁵

La clasificación de los cementos asfálticos, ha girado alrededor de las propiedades físicas de los mismos, determinados a través de métodos de ensayos que en su mayoría son empíricos; lo

⁴ <https://www.google.com.bo/search?q=estructura+coloidal+del+asfalto&client>

⁵ ESCOBAR MORALES, Selección del tipo de cemento asfáltico para producir mezclas asfálticas en caliente en El Salvador, Viceministerio De Obras Públicas, El Salvador, 2010.

anterior, principalmente debido a la complejidad y variabilidad de las propiedades o características químicas de los asfaltos. Los sistemas tradicionalmente utilizados para la clasificación de los asfaltos corresponden a:

- Sistema de Clasificación por Penetración.
- Sistema de Clasificación por Viscosidad.

1.2.4.1 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 en la región. 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. Asimismo, en 1921 la ASTM desarrolló la primera especificación para cementos asfálticos clasificados por penetración para propósitos de pavimentación, la cual sufrió un cambio significativo en 1968, al reducir el número de tipos de cemento asfáltico de 10 a 5.

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”. A continuación, en la Tabla 2-1, se presentan las características físicas que deben cumplir los cementos asfálticos, para ser clasificados de acuerdo a la norma ASTM D 946.

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO ASTM	CLASIFICACIÓN POR PENETRACIÓN (GRADOS DE PENETRACIÓN)									
		40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
		Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Penetración (0.1mm)	D5	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Flash Point (oC)	D92	232	...	232	...	232	...	218	...	177	...
Ductilidad (cm)	D113	100	...	100	...	100	...	100	...	100	...
Solubilidad (%)	D2042	99	...	99	...	99	...	99	...	99	...
Ensayos en Residuo de asfalto, después de ensayo de Película Delgada, ASTM D1754											
Penetración (%)	D5	55+	...	52+	...	47+	...	42+	...	37+	...
Ductilidad (cm)	D113	...	...	50	...	75	...	100	...	100	...

Tabla 1-1 Requisitos para clasificar el asfalto⁶

1.2.4.2 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, que posee 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 Viscosidad (AC) el cual se detalla a continuación:

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.

⁶ Especificación ASTM D 946-82

A continuación, en la Tabla 2-2, se presentan las características físicas que deben cumplir estos asfaltos:

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO ASTM	CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD (GRADOS BASADOS EN ASFALTO)									
		AC-5		AC-10		AC-20		AC-30		AC-40	
		Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Viscosidad Absoluta (Poise)	D2171	400	600	800	1200	1600	2400	2400	3600	3200	4800
Viscosidad Cinemática (cSt)	D2170	175	...	250	...	300	...	350	...	400	...
Penetración (0.1 mm)	D5	140	...	80	...	60	...	50	...	40	...
Flash Point (oC)	D92	177	...	219	...	232	...	232	...	232	...
Solubilidad (%)	D2042	99	...	99	...	99	...	99	...	99	...
Ensayos en Residuo de asfalto, después de ensayo de Película Delgada, ASTM D1754											
Viscosidad Absoluta (Poise)	D2171	2500	...	5000	...	10000	...	15000	...	20000	...
Ductilidad	D113	100	...	75	...	50	...	40	...	25	...

Tabla 1-2 Requisitos para clasificar el asfalto⁷

1.3 Conceptos Básicos de Mezclas Asfálticas

1.3.1 Definición de Mezclas Asfálticas

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

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, en las capas inferiores de los pavimentos para tráfico pesado intenso, 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 del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el

⁷ Según especificación ASTM D 3381

polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

1.3.2 Clasificación de las Mezclas Asfálticas

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

1.3.2.1 Por Fracciones de Agregado Pétreo Empleado

- Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.
- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

1.3.2.2 Por la Temperatura de Puesta en Obra

- Mezclas asfálticas en Caliente: Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.
- Mezclas asfálticas en Frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

1.3.2.3 Por la Proporción de Vacíos en la Mezcla Asfáltica

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

- Mezclas Cerradas o Densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10%.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.

- Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos supera el 20%.

1.3.2.4 Por el Tamaño Máximo del Agregado Pétreo

- Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- Mezclas Finas: También llamadas microaglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

1.3.2.5 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.

1.3.2.6 Por la Granulometría

- Mezclas Continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.
- Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

A continuación en la tabla 2-3 se presenta un resumen de los tipos parámetros de clasificación de las mezclas asfálticas:

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

Tabla 1-3 Clasificación de las Mezclas Asfálticas⁸

1.3.3 Tipología de las Mezclas Asfálticas

1.3.3.1 Mezcla Asfáltica en Caliente

Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente.

Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los pavimentos. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas con diferentes características. Se fabrican con asfaltos aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6% de asfalto en peso de agregados pétreos.

1.3.3.2 Mezcla Asfáltica en Frio

⁸ Fuente: Elaboracion propia.

Son las mezclas fabricadas con emulsiones asfálticas, y su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación de carreteras secundarias. Para retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío se suele recomendar el sellado por medio de lechadas asfálticas. Se usan además en las bases y capas intermedias, su mayor utilidad está en el mantenimiento, llámese reciclado, microsurfacing o estabilización.

Se caracterizan por su trabajabilidad tras la fabricación incluso durante semanas, la cual se debe a que el ligante permanece un largo periodo de tiempo con una viscosidad baja debido a que se emplean emulsiones con asfalto fluidificado: el aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios, haciendo viable el almacenamiento, pero después de la puesta en obra en una capa de espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya extendidas debido a la evaporación del fluidificante. Existe un grupo de mezclas en frío, el cual se fabrica con una emulsión de rotura lenta, sin ningún tipo de fluidificante, pero es menos usual, y pueden compactarse después de haber roto la emulsión.

El proceso de aumento paulatino de la resistencia se le suele llamar maduración, que consiste básicamente en la evaporación del agua procedente de la rotura de la emulsión con el consiguiente aumento de la cohesión de la mezcla.

1.3.3.3 Mezcla Porosa o Drenante

Las mezclas drenantes o porosas son mezclas asfálticas utilizadas como “carpeta de rodadura” que se caracterizan por tener un elevado porcentaje de huecos (entre 18 y 25%) interconectados entre sí que permiten el paso del agua superficial a través de ella y su rápida evacuación hacia las zonas laterales fuera de la calzada.

Este elevado porcentaje de huecos se logra mediante el uso de una granulometría especial: un alto porcentaje de áridos gruesos (alrededor del 85%), poco fino y aporte de filler

1.4 Características y Metodologías de Diseño de Mezclas Asfálticas Drenantes

1.4.1 Definición de Mezclas Asfálticas Drenantes

Las mezclas drenantes (o también denominadas porosas) son mezclas asfálticas generalmente en caliente que se utilizan como carpeta de rodadura, las cuales se caracterizan por tener un elevado porcentaje de huecos de aire (entre 18 y 25%) interconectados entre sí. Estos huecos permiten el paso del agua superficial a través de ella y por ende su rápida evacuación primero

hacia abajo y luego hacia las zonas laterales, fuera del área de contacto entre el neumático de los vehículos y el pavimento. Gracias a lo anterior, se impide la formación de una capa de agua superficial cuando llueve, evitando pérdidas de control y visibilidad en los conductores (Muñoz & Ruiz, 2008).

Existen pequeñas diferencias en cuanto al contenido de vacíos aceptado para considerar una mezcla drenante en los países donde se ha estudiado este tipo de mezclas, en la siguiente tabla 2-4 se muestran los contenidos de vacíos aceptado por algunos de ellos:

PAIS	PORCENTAJE DE VACIOS (%)	
	Mayor del	Menor del
España	16	25
Chile	18	25
Colombia	20	25

Tabla 1-4 porcentaje de vacíos

No se observa un límite inicial definido, realmente este puede parecer arbitrario, con valores inferiores aun al 16% de vacíos en la mezcla, esta puede tener una capacidad drenante apreciable, sin embargo, para que esta capacidad se mantenga durante un periodo de tiempo razonable, es necesario fijar un límite mínimo de partida.

El alto porcentaje de huecos de la mezcla drenante se logra mediante el uso de granulometría especial, que consiste en un alto porcentaje de áridos gruesos (alrededor del 85%), poco fino y un aporte de filler. Para estas mezclas se debe asegurar la impermeabilidad de la capa subyacente, debido a las posibles infiltraciones de agua que provocan fallas estructurales en este pavimento. Adicionalmente, debe tener un diseño geométrico tal que asegure el escurrimiento del agua a los drenes laterales y no se introduzca en las capas inferiores del camino.

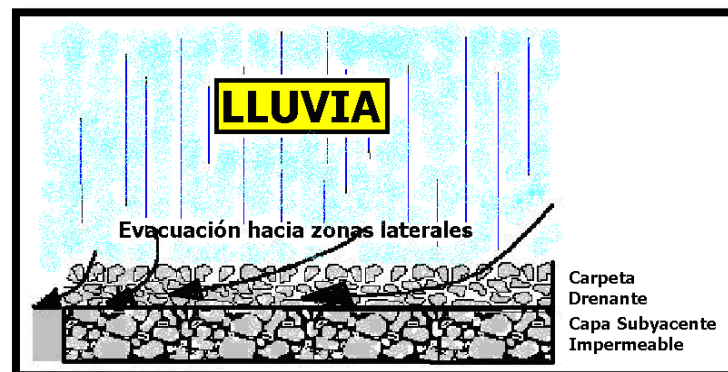


Figura N° 1-6 Esquema Mezcla Drenante⁹

1.4.2 Historia de los Pavimentos Drenantes

Los inicios de las mezclas drenantes tuvieron lugar en algunos aeropuertos del Reino Unido y luego en Estados Unidos bajo la forma de tratamiento superficial en capa de 2[cm], cuyo objetivo principal era luchar contra el deslizamiento de las aeronaves (ROULLET MEJÍAS, 2009). Luego el uso de estas mezclas comenzó a experimentar una evolución importante al desarrollarse bajo el concepto mucho más amplio de que la capa de rodadura fuera capaz de absorber las lluvias, eliminando el agua superficial que se interpone entre neumático y pavimento. Con el transcurso del tiempo, además, se detectó la capacidad de absorber el ruido generado por la rodadura de los vehículos, lo que conllevó a un aumento en su uso, haciendo de esta mezcla una de las de mayor desarrollo en Europa en los últimos 25 años.

En Europa se introdujo a finales de los años 70 y en 1980 hizo su aparición en España, donde se generalizó su uso sólo a partir de 1985. Existen mezclas drenantes con granulometrías continuas y discontinuas. Inicialmente se diseñaron con contenido de huecos entre el 15 y 18 %, pero la colmatación aparecía muy rápido con esta configuración, por lo que actualmente se exige un porcentaje mínimo de 20 %. Se han desarrollado mezclas tan porosas que ya han bordeado el 28 % de porcentaje de huecos.

La Tabla 2-5 muestra el uso de las mezclas drenantes en algunos países, principalmente de Europa. Se detalla lo construido hasta el 2001, el porcentaje de esta mezcla especial con respecto al total pavimentado por cada país, y lo que se construyó en ese año.

Se puede ver que en Japón, Holanda y Francia es donde más se ha construido este pavimento especial, y por ende donde más experiencia se tiene sobre su uso y conservación.

⁹Las Mezclas Drenantes en Chile. Universidad Técnica Federico Santa María. 193p.

<i>País</i>	<i>Área Total</i>	<i>% del total anual</i>	<i>Área aplicada en 2001</i>
	<i>en millones (m2)</i>	<i>producido el 2001</i>	<i>en millones (m2)</i>
Austria		1	
Bélgica		2	1
Dinamarca	1.3	0.3	0.2
Eslovenia	0.2	0.1	0.02
Francia	>45		
Grecia	1.2		
Holanda	48	6	5
Irlanda		3	0.84
Islandia	<0.1		
Italia	13	0.2	1
Portugal		1.2	
República Checa			0.5
Suecia		2	
Suiza		2	11
Israel		0.4	0.22
Japón	100	3.5	27
Nueva Zelanda		5	

Tabla 1-5 Uso de Mezclas Drenantes en Países en el 2001¹⁰

1.4.3 Aplicaciones, Ventajas y Desventajas de las Mezclas Asfálticas Drenantes¹¹

La utilización de mezclas asfálticas drenantes es importante en zonas de alta precipitación y cuando se requiere que el pavimento tenga condiciones drenantes diferentes, es decir con un alto contenido de vacíos.

En nuestro medio su aplicabilidad actual es esporádica en algún proyecto puntual. Sin embargo a futuro tal como ocurrió en países desarrollados, este tipo de mezclas asfálticas debe ser una alternativa.

1.4.3.1 Ventajas de las Mezclas Asfálticas Drenantes

Las mezclas drenantes ofrecen una gama de ventajas para el usuario en condiciones de lluvia entre ellas se puede mencionar las siguientes:

¹⁰ Las Mezclas Drenantes en Chile. Universidad Técnica Federico Santa María. 193p.

¹¹ Metodología de Diseño y Colocación de mezclas Drenantes. 1999. Gabriela Muñoz, Consuelo Ruiz

- Eliminación de hidroplaneo: se habla de este fenómeno cuando la capa de agua que se forma entre el neumático y el pavimento rompe el contacto entre ambos, haciendo que el conductor pierda el control de su vehículo. Una rápida evacuación del agua de la superficie del camino (que ofrece la mezcla porosa o drenante), ayuda a impedir este fenómeno.
- Resistencia al Deslizamiento con Pavimento Mojado: aun cuando no exista el hidroplaneo, la lluvia puede reducir considerablemente la resistencia al deslizamiento de la superficie del camino. Los asfaltos porosos pueden contrarrestar este efecto permitiendo, debido a su macrotextura, que exista rozamiento entre el neumático y la superficie de rodadura de modo que el vehículo realice los movimientos que desea el conductor logrando así una mayor seguridad (menor distancia de frenado).
- Reducción de proyecciones de agua: estas mezclas, como permiten mantener la superficie del pavimento libre de agua cuando está lloviendo, previenen que se produzcan tanto el levantamiento como la pulverización del agua al paso de los vehículos. Esto provoca un mejoramiento destacable en la visibilidad del conductor en condiciones de lluvia.
- Menor deslumbramiento de luces vehiculares: cuando está lloviendo de noche, los conductores se ven enfrentados al deslumbramiento por efecto de luces de vehículos que circulan en sentido contrario, ocasionando reflexión de la luz en los pavimentos mojados tradicionales. El uso de pavimentos de textura rugosa, al liberar el agua de la superficie, reducen este problema permitiendo al conductor ver mejor la vía y la señalización.
- Reducción de ruido al paso de vehículos: las mezclas drenantes contribuyen a la absorción de ruidos generados por el roce entre el neumático y el pavimento cuando el vehículo está en movimiento (tanto en condiciones de lluvia como en seco), ya que el alto porcentaje de huecos de aire interconectados, permiten disipar los ruidos hacia el interior. Gracias a esta reducción de ruidos, las personas que viven cerca de carreteras son las que más se ven favorecidas. Se estima que la reducción media

en la sonoridad ambiental es entre 3 a 6 decibeles en comparación a una mezcla normal, apreciándose incluso una diferencia mayor sobre pavimentos húmedos.

1.4.3.2 Desventajas de las Mezclas Drenantes

Las mezclas drenantes presentan las siguientes desventajas con respecto a una mezcla asfáltica convencional.

- Colmatación de poros: los huecos de las mezclas porosas durante su vida útil tienden a colmatarse por la acumulación de polvo, arena, materia orgánica u otros. Este fenómeno, a pesar de constituir una pérdida en las propiedades drenantes de la mezcla (y por ende en la reducción de ruidos, efecto neblina e hidroplaneo), no afecta en el funcionamiento como carpeta de rodadura. En la actualidad, existen máquinas de origen japonés que mediante técnicas de lavado a presión lograrían la limpieza de los poros, anulando temporalmente la colmatación.
- Mayor costo: estas mezclas deben construirse necesariamente con asfaltos modificados y áridos de una calidad superior a la normal, lo cual establece un aumento del costo directo tanto de su construcción como del mantenimiento de esta obra (con respecto a una mezcla asfáltica convencional).
- Diseño geométrico estricto: la mezcla drenante, cuando es utilizada como carpeta de rodadura, obligadamente se debe extender sobre una capa que sea impermeable y estructuralmente estable. Adicionalmente esta capa requiere de una geometría adecuada para la evacuación del agua hacia los costados de la pista.
- Drenaje lateral exigente: los huecos de esta mezcla hacen escurrir el agua de la superficie hacia drenes laterales, lo cual implica forzosamente la construcción de ductos y otras obras asociadas a la evacuación de las aguas.
- Especial cuidado invernal: en zonas donde hay posibilidad de formación de hielo, el mantenimiento invernal debe ser muy cuidadoso, lo que puede limitar su empleo. Esto se debe a que la temperatura en superficie es inferior a la de una mezcla convencional y la humedad permanece más tiempo en los poros. Se necesita mayor cantidad de sales fundentes para mantener los caminos libres de nieve, por lo que se debe organizar equipos de mantenimiento de forma aún más efectiva que en las

situaciones convencionales y actuar con anticipación. En aquellos casos en que no puedan tomarse estas precauciones es mejor evitar la colocación de mezclas drenantes.

1.4.4 Conservación y Vida Útil de Mezclas Drenantes¹²

La falla en este tipo de pavimentos viene dada principalmente por dos causas:

- Disgregación de la mezcla: ocurre producto de los esfuerzos tangenciales del tráfico. Su aparición se manifiesta con baches, peladuras de áridos y una incipiente pérdida de regularidad superficial, tanto longitudinal como transversalmente. Ocurre en zonas localizadas donde la mezcla se ha colocado fría o ha sido subcompactada.
- Colmatación progresiva de la mezcla: con el tiempo se pierde drenabilidad, ocasionado por la acumulación de polvo, arena, materia orgánica etc., en los huecos interconectados. Su aparición depende del porcentaje inicial de huecos de la mezcla, del tipo de camino (en uno rural se colmatará mucho más que en una mezcla usada en autopista).

Para conservar la permeabilidad de la mezcla, se está trabajando y avanzando en el diseño de los equipos de limpieza, compuestos hasta ahora por camiones provistos de un equipo de agua a presión y de un sistema de aspiración conectado a un depósito provisto de filtros. Dichos equipos sólo son parcialmente efectivos y tienen que aplicarse rápidamente a partir de la puesta en servicio de las mezclas, aunque no existe consenso sobre la estrategia más adecuada de limpieza y de la eficacia en cuanto al costo.

De la experiencia con este tipo de mezclas (especialmente en Europa), se estima que la pérdida total de drenabilidad puede ocurrir entre los 9 y 12 años, en tanto que la vida útil final como carpeta de rodadura varía entre los 12 y 15 años dependiendo del tránsito y la conservación realizada en su vida (igual a una mezcla asfáltica convencional).

1.4.5 Especificaciones Técnicas para el Ligante de una Mezcla Drenante

¹² (ROULLET MEJÍAS, 2009)

Los ligantes para mezclas drenantes serán cementos asfálticos. Las diversas normas extranjeras proponen ciertos requisitos que deben cumplir, los cuales se presentan en la Tabla 2-6.

Ensayo	Norma AASHTO	Exigencia				
		Chilena	Colombiana		Argentina	
			Tipo I	Tipo II	AM2	AM3
Penetración a 25oC 100 gr, 5 seg, 0.1 mm	T49	60-80	55-70	55-70	50-80	50-80
Punto de ablandamiento, oC	T53	>65	>58	>58	>60	>65
Recuperación Elástica, %	T301	>60	>15	>15	>40	>70
Punto de flama, oC	T48	>235	>230	>230	>230	>230
Ductilidad 25 oC, 5cm/min, cm	T51	>100	....	....	....	....

Tabla 1-6 Requisitos del cemento asfáltico¹³

1.4.6 Especificaciones Técnicas para los Agregados de Mezclas Drenantes

Los agregados, constituyen una parte importante, ya que ayudan al comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica. Son fragmentos duros e inertes, que incluyen grava, gravillas, arena, roca y polvo de roca. En la mezcla para pavimentos asfálticos el agregado aporta del 90 – 95% de la mezcla. Por tal motivo, la dosificación asfalto agregado es muy importante y requiere un control muy riguroso, especialmente en la granulometría. Una buena composición de agregado grueso y fino, proporciona a la mezcla mejor densidad, estabilidad, menor porosidad y una cantidad de vacíos adecuada, resultando una mezcla más compacta y resistente, garantizando un buen comportamiento durante su período de vida.

1.4.6.1 Agregado Grueso

Se define como agregado grueso a la porción del agregado retenida en el tamiz de 4,75 mm (No.4) según la ASTM E-11. Este agregado deberá provenir de la desintegración de roca, de grava o por una combinación de ambas; sus fragmentos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin presencia exagerada de partículas planas, alargadas, blandas, deberá estar exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias que puedan impedir la adhesión completa

¹³ Manual de carreteras de la dirección general de obras públicas de Chile; Art. 453-07 Mezcla Drenante del Instituto nacional de Vías de Colombia y las Especificaciones técnicas generales de concretos asfálticos drenantes (CAD 12) para carpetas de rodamiento de Argentina.

del asfalto o afecten adversamente la durabilidad de la mezcla compactada. En la Tabla 2-7 se presenta los requisitos que debe cumplir el agregado grueso para mezclas drenantes.

Ensayo	Norma	Exigencia		
		Chilena	Colombiana	Argentina
Partículas trituradas en dos caras	ASTM D-5821	> 98	> 70%	> 75%
Índice de Lajas	AASHTO C-142	< 25%	....	< 25%
Coefficiente de Desgaste los Ángeles.	ASTM C-131	< 20%	< 25%	< 25%
Durabilidad por ataque con sulfato de sodio.	ASTM C-88	.....	< 12%	< 10%
Índice de Plasticidad.	ASTM D-4318	Ninguna	N.P.	No plástico
Adherencia método estático.	ASTM D-1664	> 95%	....	> 95%

Tabla 1-7 Requisitos del Agregado Grueso

1.4.6.2 Agregado Fino

Se llama agregado fino a la porción del agregado comprendida entre los tamices No. 4 y N 200 según la norma ASTM-11. El agregado fino debe cumplir con los requisitos de la Tabla 2-8.

Ensayo	Norma	Exigencia		
		Chilena	Colombiana	Argentina
Índice de plasticidad	ASTM D-4318	No plástico	No plástico	No plástico

Tabla 1-8 Requisitos del Agregado Fino¹⁴

1.4.6.3 Relleno Mineral (FILLER)

Se denomina como filler aquella fracción que pasa por la malla N° 200 según la norma ASTM E-11. Debe proceder de los agregados pétreos o de productos comerciales como cemento hidráulico y cal hidratada. Debe estar libre de partículas de arcilla y de materia orgánica.

El filler total deberá estar formado por un mínimo de 50% de aportación y el porcentaje restante proveniente de los agregados grueso y fino.

¹⁴ Manual de carreteras de la dirección general de obras públicas de Chile; Art. 453-07 Mezcla Drenante del Instituto Nacional de Vías de Colombia y las Especificaciones técnicas generales de concretos asfálticos drenantes (CAD 12) para carpetas de rodamiento de Argentina.

Si se utilizan los materiales comerciales como filler de aporte en este tipo de mezclas, se recomienda no superar el valor de la misma al 3% del peso total de los agregados pétreos.

1.4.6.4 Mezcla de Agregados

El conjunto de agregado grueso, agregado fino y filler deberá ajustarse a la gradación indicada en la siguiente tabla 2-9:

TAMIZ ASTM	TAMIZ (mm)	MD-1*	
		ESP. INF	ESP. SUP
3/4"	19.00	100	100
1/2"	12.50	70	100
3/8"	9.50	50	75
Nro 4	4.75	15	32
Nro 10	2.00	9	20
Nro 40	0.43	5	12
Nro 200	0.08	3	7

Tabla 1-9 Franja Granulométrica para Mezclas Drenantes¹⁵

Se busca que la curva granulométrica encaje en estos límites, con el objeto de obtener un alto contenido de vacíos en la mezcla, además, para prevenir segregaciones y garantizar los niveles de compactación y resistencia exigidos por la especificación; el material a producir deberá dar lugar a una curva granulométrica sensiblemente paralela a los límites de la franja, sin saltos bruscos de la parte superior de un tamiz a la inferior del tamiz adyacente y viceversa.

¹⁵ Tabla 453.1 Franja granulométrica para mezclas drenantes. Artículo 453-01, normativa INVIAS Colombia

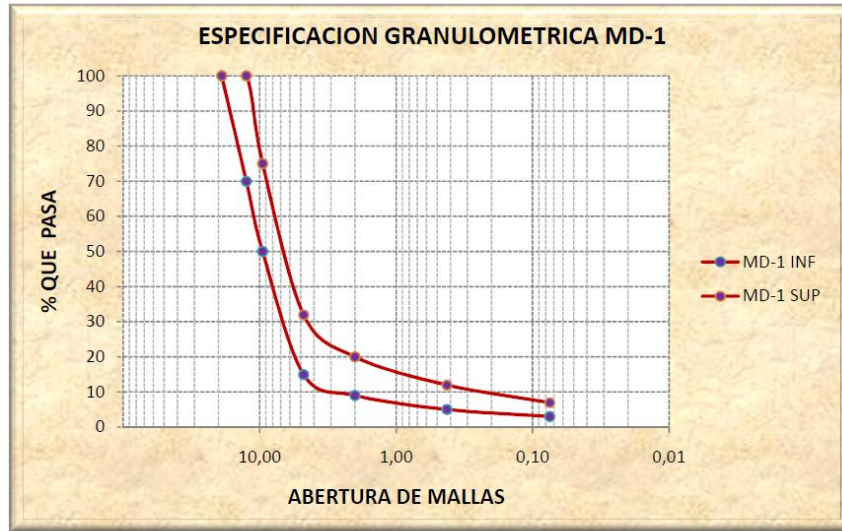


Figura N° 1-7 Especificación granulométrica MD-1¹⁶

1.4.7 Metodologías de Diseño de Mezclas Asfálticas Porosas o Drenantes

(Muñoz & Ruiz, 2008) Existen diferentes metodologías de diseño de mezclas drenantes y la particular estructura interna que presentan estas mezclas, ha llevado a desarrollar ensayos que ayudan a evaluar su comportamiento.

1.4.7.1 RP (Origen Chile)

Esta metodología fue desarrollada en Chile, en el Laboratorio Nacional de Vialidad, MOP, por los Ing. Héctor Rioja V. y Gabriel Palma P.

La metodología consiste en la medición del esfuerzo a la penetración, a temperatura y velocidad controlada, que presentan briquetas de mezcla asfáltica abierta, fabricadas de acuerdo con la metodología Marshall. Utilizando en este caso 45 golpes por cara y distintos contenidos de ligante, considerando que la mezcla óptima es aquella que presenta el valor máximo de esfuerzo a la penetración.

Para el ensayo, los autores especifican una temperatura de laboratorio de 20 °C, dejando las briquetas enfriar a esta temperatura y posteriormente colocándolas en forma vertical en una prensa Marshall. En esta disposición son penetradas a una velocidad de 1 mm/min por un pistón

¹⁶ Franja granulométrica para mezclas drenantes. Artículo 453-01, normativa INVIAS Colombia

de acero de 50 mm de diámetro y un largo de 105 mm adaptado al aro dinamométrico de la prensa.

Para realizar el proyecto de una mezcla por esta metodología, se escoge el huso granulométrico, se establecen distintos porcentajes de ligante, se moldean tres briquetas por cada tenor de ligante y se realiza el ensayo de penetración.

Por definición, el cálculo de esfuerzo se realiza considerando el valor medio entre el área del pistón y área de la base de la briketa.

Los distintos esfuerzos de penetración son graficados para cada tipo de mezcla y sus respectivos porcentajes de ligante asfáltico. De dicha gráfica se obtiene el máximo esfuerzo de penetración, que corresponde a un porcentaje de ligante que es adoptado como el Ligante de Diseño.

1.4.7.2 Cántabro (Origen España)

En 1979, Félix Pérez Jiménez y Carlos Kraemer, comenzaron a realizar trabajos para establecer una metodología de dosificación en laboratorio para estas mezclas, llegando a desarrollar dos ensayos:

- Cántabro, ensayo de pérdida por desgaste en la máquina Los Ángeles, para la caracterización mecánica.
- Permeámetro de carga variable LCS, para la caracterización hidráulica de porcentajes de vacíos, ya sea en Laboratorio o en campo.

El ensayo Cántabro puede realizarse tanto en estado Seco como en Húmedo, simulando en laboratorio la acción abrasiva del tránsito y la influencia del agua, lo que permite el estudio y dosificación de estas mezclas.

Este método ha utilizado como base el método universal de caracterización de ligantes, ya que su metodología puede ser utilizada en mezclas con porcentajes de vacíos mayores a 20%, situación que impide el uso del método Marshall diseñado para mezclas con porcentajes de vacíos menores al 8%.

Cuanto mayor es la calidad y porcentaje de los componentes que proporcionan la cohesión a la mezcla, menores son las pérdidas. Como resultado del ensayo, se obtiene la pérdida en peso de la briketa, en tanto por ciento, referido a su peso inicial.

Las recomendaciones más usuales para mezclas porosas para capas de rodadura establecen los siguientes valores máximos y mínimos de exigencias.

- Porcentaje de Huecos $> 20\%$ y $< 25\%$.
- Pérdida al Cántabro seco (25 °C) $< 25\%$.
- Pérdida al Cántabro tras Inmersión (24 hrs, 60 °C) $< 40\%$.

La medición de permeabilidad se hace a través de un permeámetro de carga variable LCS, (NLT 327/88 - Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes con el Permeámetro LCS). El ensayo consiste en medir el tiempo que demora una cierta cantidad de agua en evacuarse del tubo del permeámetro pasando a través de dos marcas, filtrándose en la mezcla. Estudios españoles han podido determinar correlaciones entre permeabilidad y tiempo de evacuación y porcentaje de huecos versus tiempo de evacuación. Si bien esta metodología fue diseñada para medir permeabilidad in situ de las mezclas drenantes, este permeámetro se utiliza también en laboratorio.

La metodología cántabro, contempla los siguientes pasos:

Caracterización de los Agregados y Elección de la Curva Granulométrica.

Caracterización del Cemento Asfáltico y Elección del Porcentaje de Ligante para el Diseño.

Siguiendo las normas de ensayo respectivas, se obtienen las propiedades del asfalto necesarias para caracterizarlo como un asfalto para mezclas drenantes. Se obtienen además las temperaturas de mezclado y compactación para la elaboración de las briquetas de ensayo. (Ver más adelante en el punto 2.4.9)

Para la elección del contenido de ligante se usara el método de diseño de mezclas asfálticas abiertas (AASHTO R12-85).

Elaboración de Briquetas de Ensayo.¹⁷

Equipos y materiales

¹⁷ “A0615. Método para Caracterización de las Mezclas Asfálticas Abiertas por Medio del Ensayo Cántabro de Perdida por Desgaste”. Manual de Ensayos de Suelos y Materiales Asfaltos. Volumen IV Administradora Boliviana de Carreteras

Equipo de compactación.- Formado por el molde, collar, placa de base y maza de compactación, empleados en el método A0608 para la fabricación de probetas Marshall.

Termómetros.- Para medir las temperaturas de los agregados, ligante y mezcla asfáltica, se emplearán termómetros metálicos, con escala hasta 200° C y sensibilidad de 3° C. Para la medida de la temperatura a la que se realiza el ensayo, se utilizará un termómetro con escala 0 a 40° C y sensibilidad de 0.5°C.

Balanzas – Una balanza de 2 kg de capacidad y 0.1 g de sensibilidad para pesar las probetas y otra de 5 kg de capacidad y 1 g de sensibilidad para la preparación de las mezclas.

Cámara termostática – Para mantener constante la temperatura durante el ensayo, se deberá disponer de una cámara o recinto capaz de alojar la máquina de Los Ángeles, y en la que la temperatura de ensayo se pueda regular con un error máximo de $\pm 1^\circ \text{C}$.

Material general – Bandejas, recipientes, espátulas, guantes de amianto, lápices grasos, cogedores curvos, discos de papel de filtro, etc.

Procedimiento

Número de probetas – Se prepara 45 briquetas con porcentajes de ligante asfáltico de 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5% para tres granulometrías diferentes.

Preparación de los agregados – Las distintas fracciones de agregados que componen la mezcla se secan en estufa hasta masa constante a una temperatura de 105° a 110° C.

Temperaturas de mezcla y compactación – Las temperaturas del ligante en la mezcla y compactación de las probetas, serán las adecuadas para hacer compatible una buena envuelta sin que se produzca escurrimiento. Como criterio orientador, se pueden elegir las temperaturas que se prescriben, según viscosidad, en el punto 20 del método AMezC8, modificándolas si fuera preciso para cumplir los requisitos de envuelta y escurrimiento indicados antes.

Preparación de mezclas – Se pesan sucesivamente en un recipiente tarado las cantidades de cada fracción de los agregados necesarias para la fabricación de una probeta, de tal modo que la cantidad total de agregados sea de 1.000 g. El resto del proceso de preparación coincide con el indicado en el Método A0608 para la fabricación de las probetas Marshall.

Compactación de las mezclas – La energía de compactación será de 50 golpes por cara, empleando el equipo y procedimiento de compactación descritos en el método A0608.

Densidad y análisis de vacíos – Una vez desmoldadas las probetas, se determina su densidad y contenido de vacíos a partir de la medida geométrica de su volumen y densidad relativa de los materiales, según el Método A0608 (ver anexo).

Ejecución del Ensayo.

En general, la temperatura de ensayo estará comprendida entre 15° y 30° C, con una tolerancia máxima de ± 1° C.

Se determina la masa de cada probeta con aproximación de 0.1 g y se anota este valor como P1. Antes de ensayarlas, las probetas se mantienen a la temperatura de ensayo un mínimo de seis (6) horas.

Se introduce a continuación una probeta en el bombo de la máquina de Los Ángeles y, sin la carga abrasiva de las bolas, se hace girar el tambor a la misma velocidad normalizada en las normas Método AAgreg11 de 3.1 a 3.5 rad/s (30 a 33 rpm), durante 300 vueltas.

Al final del ensayo, se saca la probeta y se determina de nuevo su masa con la misma aproximación de 0.1 g, anotando este valor como P2.

El ensayo se repite de forma idéntica con cada una de las probetas análogas preparadas según lo descrito en preparación de las probetas.

Cálculos

Se calcula el resultado del ensayo de pérdida por desgaste para cada probeta ensayada, mediante la expresión:

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100 \quad \text{Ecuación 1-1}$$

Dónde:

P = valor de la pérdida por desgaste, en %,

P1 = masa inicial de la probeta, en gramos.

P2 = masa final de la probeta, en gramos.

Se calcula el valor medio de todas las probetas análogas ensayadas según el procedimiento.

En el resultado se incluirá la pérdida media por desgaste y la temperatura de ensayo.

1.4.7.3 Descripción del Método Marshall

- El método Marshall usa muestras de prueba normalizadas (briquetas) de 2 y ½” de espesor por 4” de diámetro (64 x 102 mm).
- Se selecciona el agregado que cumpla con las especificaciones requeridas. El tipo y grado del asfalto, de acuerdo al tipo de agregado y las condiciones climáticas.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto se preparan y compactan una serie de muestras de prueba (briquetas), con distintos porcentajes de asfalto cuyo rango de variación no debe ser mayor a 0,5%. Como mínimo se debe incluir dos porcentajes por encima y dos por debajo del óptimo de contenido de asfalto estimado.

Para verificar la idoneidad de los datos se deben hacer tres muestras (briquetas) por cada contenido de asfalto. Generalmente para un diseño, se deben tomar 6 porcentajes de asfalto diferentes, por lo cual se requerirán 18 briquetas. Se necesitan 1200 g de agregados, por lo cual la cantidad representativa de los agregados, debe tener un peso mínimo de 29 kg.

Equipo

Entre los elementos más importantes del equipo necesario para la elaboración de los núcleos de prueba, se pueden citar los siguientes:

- Horno y placa calentadora eléctrica, para calentar los materiales, Horno aireador para el curado de las mezclas.
- Termómetro blindado de vidrio o dial con varilla para lecturas entre 50 °F (10 °C) y 450 °F (232 °C).
- Balanza de 2 kg de capacidad, con aproximación a 0,1 g. Balanza de 5 kg con aproximación a 1 g.
- Pedestal para compactación, que consta de un soporte de madera, sobre el cual descansa una placa de acero de 12” x 12” x 1” (305 x 305 x 25 mm).

- Molde de compactación que consta de una base, molde encofrado y collar de extensión. El molde tiene un diámetro interior de 4" (101,6 mm) y una altura aproximadamente 3" (76 mm). La base y el collar están diseñados para intercambiarse ya sea a uno u otro lado del molde.
- Martillo de compactación, que consta de una barra achatada que cae deslizándose sobre una guía y un pisón de cara circular de 3 7/8" (98,4 mm). La barra pesa 10 libras (4,5 kg) y tiene una caída (guía) de 18" de altura.
- Soporte del molde, que consta de un dispositivo de tensión elástica, diseñado para acoplar el molde sobre el pedestal de compactación.
- Extractor de muestra o prensa para extraer la muestra (briqueta) ya compactada.
- Accesorios como cucharas, espátula, mezclador mecánico.

1.4.8 Comportamiento de las Mezclas Asfálticas.

Una muestra de mezcla de pavimento preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla, y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Las cuatro características son:

- Densidad de la mezcla.
- Vacíos de aire, o simplemente vacíos.
- Vacíos en el agregado mineral.
- Contenido de asfalto.

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

En las pruebas y el análisis de diseño de mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico (kg/m³) o libras por pie cúbico (Lb/ft³).

La densidad se calcula al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000Kg/m³ ó 62.416Lb/ft³). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no adecuado. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que muy rara vez la compactación in-situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación del laboratorio.

Vacíos de aire, (o simplemente vacíos). Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional.

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

Vacíos en el agregado mineral. Los vacíos en el mineral (VAM) son los espacios de aire que existen entre las partículas del agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción en el agregado).

Y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VMA, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VAM los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla.

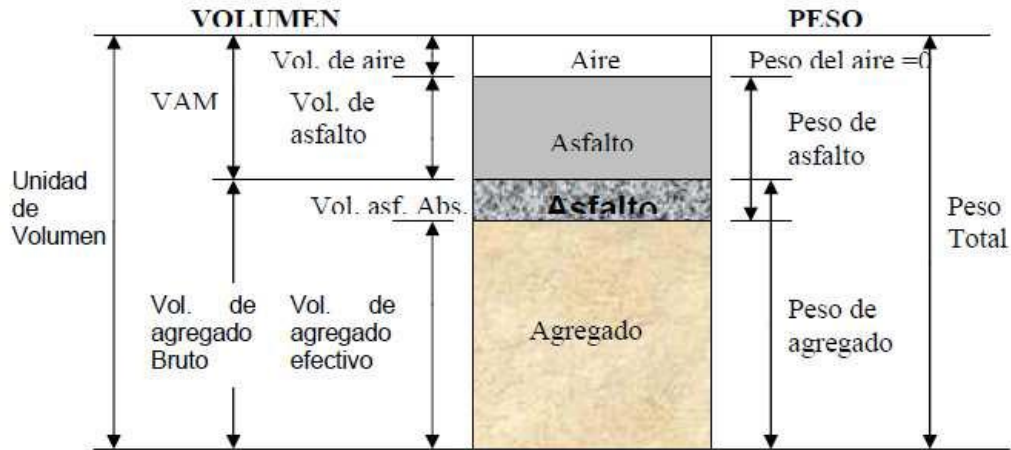


Figura N° 1-8 Representación de los Volúmenes en una Briqueta Compactada de Mezcla Asfáltica.

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

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

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción.

La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir uniformemente todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral. Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber literalmente gran parte del contenido de asfalto resultando en una

mezcla inestable y seca .Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario; poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda).

Cualquier variación en el contenido de relleno mineral, causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado relleno mineral cualquier ajuste arbitrario para corregir la situación, probablemente la empeora. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá efectuar un muestreo en unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y si es necesario establecer otro diseño de mezcla.

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado utilizado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se pueda cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto.

Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido; contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado, es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados.

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. Generalmente se conoce la capacidad de absorción de las fuentes comunes de agregado, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas.

1.5 Caracterización de Materiales Granulares

Agregado mineral: Conocido como roca, material granular o agregado mineral es cualquier material duro e inerte utilizado en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento asfáltico. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca.

1.5.1 Ensayos a los Agregados

Los agregados que se utilizaran para el diseño de la mezcla drenante, son agregados procesados, con un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ".

Los ensayos que serán realizados a las fracciones de agregados a ser utilizados en el diseño de la mezcla son:

1.5.1.1 Método para extraer y preparar muestras (ASTM C 75 AASHTO T2-91)

El objeto de este método establece los procedimientos para extraer y preparar las muestras representativas de áridos finos, gruesos para fines de ensayo.

El tamaño de la muestra de laboratorio será la necesaria dependiendo del tipo de ensayo que será sometido el material, generalmente las cantidades mínimas requeridas para los ensayos básicos de calidad son las siguientes árido fino 30kg árido grueso 60kg aproximadamente.

La extracción de la muestra será de material manufacturado de tolvas o depósitos o bien desde acopios. La extracción será del acopio de agregado de la planta de asfalto que se encuentra ubicada en la comunidad el Molino cantón Izcayachi.

1.5.1.2 Ensayo para tamizar y determinar la granulometría (ASTM D-422)

El análisis granulométrico tiene como objeto, que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en la mezcla asfáltica drenante en ciertos porcentajes.

Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla.

El método utilizado para determinar la graduación de los agregados es por tamizado seco, el mismo que tiene las siguientes características:

- Las muestras para el tamizado son reducidas por medio de un "cuarteador" de muestras.
- Los materiales finos y gruesos son separados utilizando un tamiz de 2.36 mm (N°8).
- Las muestras son secadas en el horno hasta un peso constante.
- Las muestras finas y las muestras gruesas son tamizadas separadamente.

- El peso de las fracciones (porciones) retenidas en cada tamiz, y el platón que esta al final de los tamices, es registrado, así como la graduación de cada muestra (parte fina y parte gruesa).

La granulometría utilizarse está expuesta de acuerdo a la tabla 2-10.

TAMIZ ASTM	TAMIZ (mm)	MD-1*	
		ESP. INF	ESP. SUP
3/4"	19.00	100	100
1/2"	12.50	70	100
3/8"	9.50	50	75
Nro 4	4.75	15	32
Nro 10	2.00	9	20
Nro 40	0.43	5	12
Nro 200	0.08	3	7

Tabla 1-10 Franja granulométrica para mezclas asfálticas Drenantes¹⁸

1.5.1.3 Gravedad Específica en Agregados Finos, AASTHO T-84.

El método es como sigue:

1. Aproximadamente 1000 gr. de agregado fino se seca a peso constante.
2. Se sumerge el material por 24 horas en agua.
3. La muestra se extiende en una superficie plana y se expone a una corriente de aire caliente.
4. La condición saturada superficialmente seca se alcanza cuando el material cae al invertirse el cono en el que la muestra del material fue suavemente compactada.
5. Aproximadamente 500 gr. del material en la condición saturada superficialmente seca se colocan en un matraz que se llena con agua y se eliminan los aires atrapados.
6. El agregado se saca del matraz, se seca al horno a peso constante
7. La gravedad específica se calcula de la siguiente manera:

$$G_{sa} = \frac{A}{B+A-C} \quad \text{Ecuación 1-2}$$

$$G_{sb} = \frac{A}{B+D-C} \quad \text{Ecuación 1-3}$$

¹⁸ Tabla 453.1 Franja granulométrica para mezclas drenantes. Artículo 453-01, normativa INVIAS Colombia

$$G_{sssb} = \frac{D}{B+D-C} \quad \text{Ecuación 1-4}$$

$$\text{Absorción} = \left[\frac{D-A}{A} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 1-5}$$

Dónde:

A: Peso en el aire del agregado seco al horno, gr.,

B: Peso del matraz (picnómetro) con agua, gr.

C: Peso del matraz (picnómetro) con el agregado y agua hasta la marca, gr.

D: Peso del material saturado superficialmente seco (500+10 gr)

1.5.1.4 Gravedad específica en agregados gruesos, AASHTO T-85.

La muestra a ser evaluada se satura y pesa en su condición saturada superficialmente seca,. El procedimiento es como sigue:

1. Aproximadamente 5 kg. de material retenidos en la malla N°4 (4.75 mm) se lava y seca hasta que alcance peso constante.
2. La muestra seca se sumerge por 24 horas en agua.
3. Los agregados se sacan del agua y secan superficialmente con ayuda de una toalla.
4. Se obtiene el peso de la muestra en su condición superficialmente seca.
5. La muestra saturada superficialmente seca se coloca en una cesta de alambre y se determina el peso de la muestra sumergido en agua.
6. La muestra se seca al horno hasta obtener peso constante.
7. La gravedad específica se calcula según:

$$G_{sa} = \frac{A}{A-C} \quad \text{Ecuación 1-6}$$

$$G_{sa} = \frac{A}{B-C} \quad \text{Ecuación 1-7}$$

$$G_{sssb} = \frac{B}{B-C} \quad \text{Ecuación 1-8}$$

$$\text{Absorción}(\%) = \left[\frac{B-A}{A} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 1-9}$$

Dónde:

A: Peso en el aire del agregado seco al horno, gr.,

B: Peso en el aire del agregado saturado superficialmente seco, gr.

C: Peso del agregado saturado superficialmente seco sumergido en agua, gr

1.5.1.5 Ensayo para determinar el desgaste mediante la máquina de los Ángeles (ASTM E 131 AASHTO T96-99).

El método se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la máquina de Los Ángeles.

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

Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El Ensayo de Desgaste de Los Ángeles, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o a la abrasión.

El resultado del ensayo se expresa en porcentaje de desgaste, calculándose como la diferencia entre el peso inicial y final de la muestra de ensayo con respecto al peso inicial.

Ecuación N°5: Porcentaje de Desgaste.

$$\%P = \frac{w_1 - w_2}{w_1} * 100 \quad \text{Ecuación 1-10}$$

Entre menor sea el porcentaje de desgaste obtenido en el ensayo, mayor será la resistencia de los materiales para soportar la abrasión producida por efecto de las cargas del tránsito vehicular.

El desgaste máximo permisible es de 25%. De acuerdo a la graduación del material existen 4 tipos de abrasión.

1.6 Caracterización del Cemento Asfáltico

1.6.1 Ensayos del asfalto

El tipo de asfalto a usar para el diseño de la mezcla drenante consiste en un asfalto tipo BETUPEN PLUS 85-100.

Los ensayos que se realizaran son los siguientes:

1.6.1.1 Ensayo de penetración (ASTM D-5)

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un asfalto, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra del asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otra condiciones, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25°C, que la aguja está cargada con 100 gr y que la carga se aplica durante 5 s (ver Figura 2-9), La penetración determinada en estas condiciones se llama penetración normal .Es evidente que cuanto más blando sea el asfalto mayor será la cifra que indique su penetración.

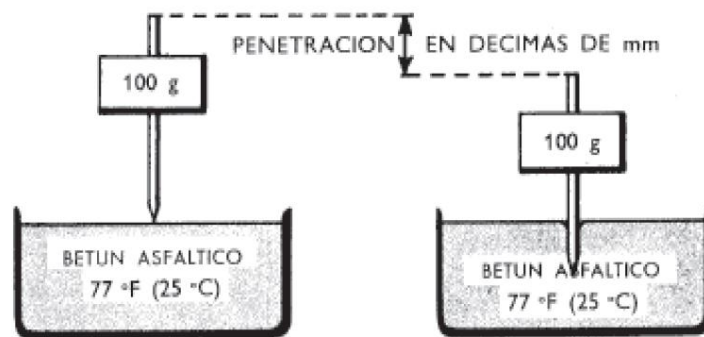


Figura N° 1-9 Ensayo normal de penetración

1.6.1.2 Ensayo para determinar la ductilidad (ASTM D- 113)

Es una característica de los asfaltos importante en muchas aplicaciones .La presencia o ausencia de ductilidad, sin embargo, tiene usualmente mayor importancia que el grado de ductilidad existente. Los asfaltos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos que les falta esta característica .Por otra parte ,los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura .En algunas aplicaciones ,como las mezclas para pavimentación, tienen gran importancia la ductilidad y el poder aglomerante, mientras que en otras , como la inyección bajo losas de hormigón y el relleno de grietas, la propiedad más esencial es una baja susceptibilidad a los cambios de temperatura .

La ductilidad del asfalto se mide en un ensayo de extensión del tipo representado en la figura 2-10. El ensayo consiste en moldear en condiciones y con dimensiones normalizadas una probeta de asfalto que después se somete a la temperatura normalizada del ensayo y se somete a

alargamiento con una velocidad especificada hasta que el hilo que une los dos extremos rompe. La longitud (en cm) a la que el hilo de material se rompe define la ductilidad.

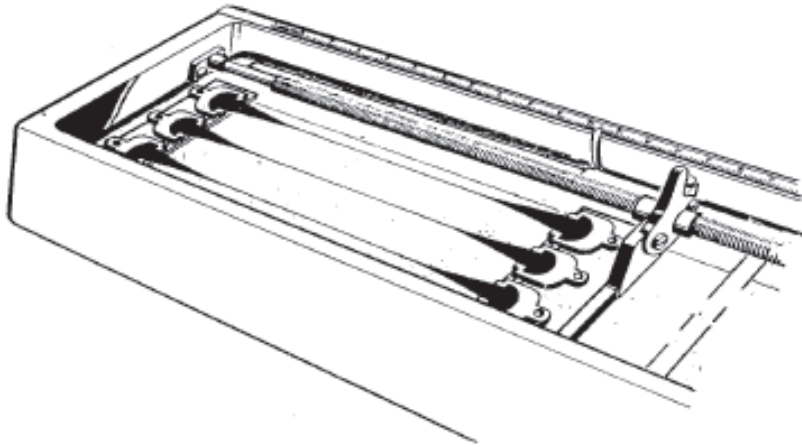


Figura N° 1-10 Ensayo de ductilidad

1.6.1.3 Ensayo para determinar la viscosidad cinemática (ASTM E-102)

La finalidad del ensayo de viscosidad es determinar el estado de fluidez de los asfaltos a la temperatura que se emplea durante su aplicación. La viscosidad o consistencia del asfalto se mide en el ensayo de viscosidad Saybolt-Furol, se emplea un viscosímetro Saybolt con orificio furol. Se coloca en un tubo normalizado cerrado con un tapón de corcho una cantidad específica de asfalto. Como la temperatura a que se determina la viscosidad de los asfaltos son frecuentemente superior a los 100°C, el baño de temperatura constante del viscosímetro se llena con algún tipo de aceite. Cuando el asfalto ha alcanzado una temperatura establecida, se quita el tapón y se mide el tiempo necesario en segundos para que pasen a través del orificio Furol 60 ml del material.

Cuanto más viscoso son los materiales más tiempo es necesario para que pasen a través del orificio.

1.6.1.4 Punto de inflamación (ASTM D-92).

El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el ligante asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación

consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto.

El punto de inflamación de un asfalto se mide por el ensayo en vaso abierto Cleveland .según condición normalizada prescrita en el método ASTM D-92. En la figura 2-11 se representa esquemáticamente el ensayo. Un vaso abierto de latón se llena parcialmente con asfalto y se calienta a una velocidad establecida .Se hace pasar periódicamente sobre la superficie de la muestra una pequeña llama, y se define punto de llama la temperatura a la que se han desprendido vapores suficientes para producir una llamarada repentina.

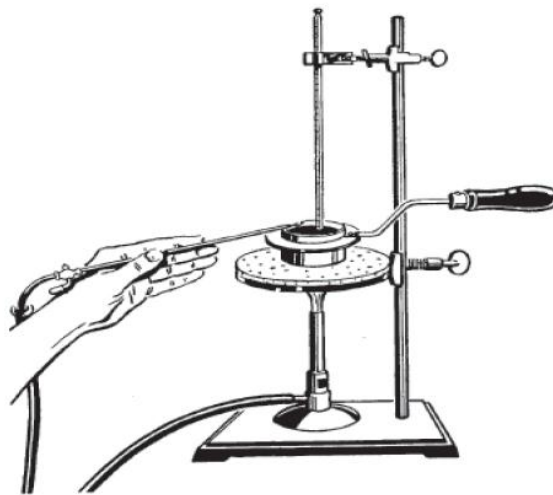


Figura Nº 1-11 Ensayo del punto de inflamación

1.7 Tomografía Computarizada con Rayos-x

1.7.1 Definición

La TC-RX se basa en la utilización de rayos-X para irradiar cuerpos y la cuantificación posterior de las diferencias de intensidad de radiación inicial y final, con base en las cuales es posible obtener imágenes digitales que pueden ser analizadas mediante software de análisis de imágenes o por inspección visual. Esencialmente, el equipo de TC RX consta de una fuente de emisión de rayos X y de un detector de intensidad.

1.7.2 Utilización en la Ingeniería

Los avances tecnológicos del último siglo han permitido que la ingeniería de pavimentos cuente con herramientas sofisticadas, cada vez más precisas y confiables para evaluar parámetros y

características de los materiales utilizados en la construcción de vías. Algunas de estas tecnologías, tales como Tomografía Computarizada de rayos-X (TC-RX), sistema de imágenes de agregados- AIMS (por sus siglas en inglés a partir de Aggregate Imaging System) y sensores de temperatura, entre otros, facilitan el ejercicio de la investigación y el desarrollo de nuevos materiales, así como la evaluación de su desempeño tanto en laboratorio como en campo.

En particular, la TC-RX se ha utilizado recientemente en numerosas investigaciones (ALVAREZ LUGO, et al., 2008) debido principalmente a: 1) su carácter no destructivo, 2) la rapidez de los ensayos, 3) la facilidad de uso, 4) la confiabilidad de los resultados y 5) los costos de ensayo relativamente bajos en el contexto de actividades de investigación.

La tomografía computarizada con rayos-X se basa en la adquisición de imágenes usando rayos-X y su posterior análisis empleando algoritmos computacionales. Esta técnica ha ganado amplia aceptación en los últimos años y ha sido empleada exitosamente para analizar la microestructura de diversos medios porosos, tales como textiles, materiales biológicos y mezclas asfálticas. La importancia de la tomografía computarizada con rayos-X en mezclas asfálticas radica en que ha permitido contar con información confiable de su estructura interna para:

- Determinar las características de sus vacíos (i.e., tamaño, distribución y conectividad:
- Analizar el daño potencial por humedad
- Modelar el flujo de agua en su interior
- Caracterizar aspectos relacionados con su compactación
- Identificar la degradación de los agregados que componen estos materiales entre otros.

1.7.3 Descripción de la Técnica de Rayos-x para Caracterizar Mezclas Drenantes¹⁹

Los sistemas de rayos-X empleados en el análisis de mezclas asfálticas son similares a los utilizados en el ámbito médico.

¹⁹ Revista Ingeniería e Investigación Vol. 28 “Tomografía Computarizada con Rayos-x y Sistema de imágenes de Agregados (AIMS) para el Estudio de Mezclas Asfálticas y Agregados”.

Sin embargo, a diferencia de estos, en el área de ingeniería de pavimentos la intensidad de los rayos-X y el tiempo de exposición empleados son normalmente mayores, lo que produce imágenes de mayor resolución. La resolución de una imagen, R , puede definirse como la razón entre la dimensión del objeto analizado, $L_{x,y}$, y el número de píxeles, $\# p$. Por lo tanto, una misma imagen puede tener diferentes resoluciones, R_x o R_y , a lo largo de sus ejes, si las dimensiones del objeto son distintas:

$$R_{x,y} = \frac{L_{x,y}}{\# p} \quad \text{Ecuación 1-11}$$

En general, es deseable contar con la mayor resolución posible, lo que se traduce en menores valores de R , es decir, una menor cantidad de material representada por cada píxel. Existen diferentes equipos de rayos-X de uso industrial cuya clasificación depende del tamaño del objeto a observar y de su resolución: 1) convencional, 2) alta resolución, 3) ultra alta resolución, y 4) micro tomografía.

Los equipos comúnmente utilizados en el análisis de mezclas asfálticas son los de alta resolución y ultra alta resolución, capaces de estudiar objetos con una resolución máxima de 100 μ m y 10 μ m, respectivamente.

Los elementos básicos que conforman un equipo de rayos-X son una fuente y un detector. La geometría de los rayos-X y del detector varía dependiendo del equipo. Para el estudio de mezclas asfálticas típicamente se emplean rayos colimados que cubren en su totalidad el ancho del objeto y una serie de detectores en línea (Figura 2-12). El objeto a escanear se ubica entre la fuente y el detector (figura 2-13) y se envía una descarga de rayos-X desde la fuente hacia el objeto, midiendo la intensidad de la radiación que llega al detector.

La densidad del objeto determina la intensidad de los rayos-X que llegan al detector. Entre mayor es la densidad del objeto menor es la intensidad de radiación detectada, puesto que los rayos-X son absorbidos por el objeto o reflejados hacia la fuente.

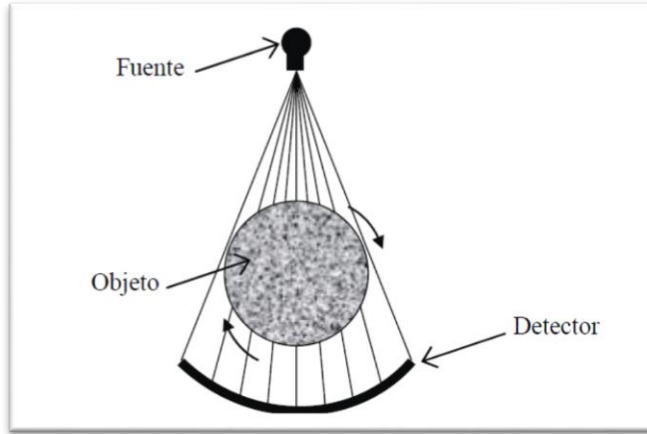


Figura N° 1-12 Sistema de Rayos-x: vista en planta de los principales componentes

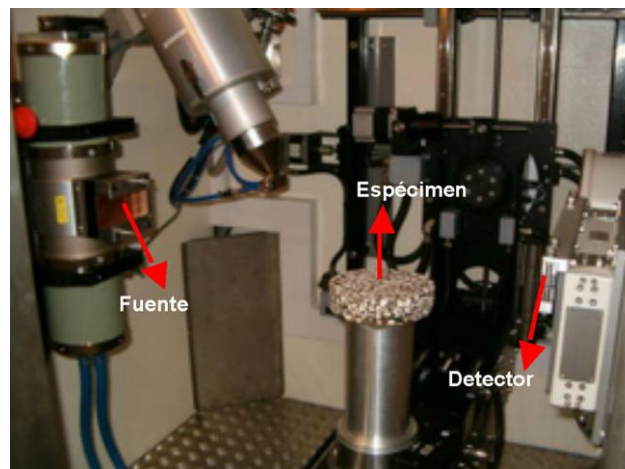


Figura N° 1-13 Equipo Típico de Rayos-x (Texas A&M University)²⁰

Cada una de las mediciones antes descritas se denomina *vista*. Es común que la fuente y el detector, o serie de detectores, sean fijos, y que el objeto se ubique sobre una mesa giratoria (flechas curvas en diagrama de la Figura 2-12). De esta manera, mientras el objeto rota alrededor de su propio eje se adquieren múltiples vistas en todas sus posibles orientaciones, las cuales permiten la reconstrucción posterior de imágenes bidimensionales. Dichas imágenes se denominan *secciones*, ya que muestran la sección interior del objeto como si este hubiera sido cortado en un plano horizontal.

²⁰ Principales hallazgos del análisis de la estructura interna de mezclas asfálticas determinada a partir del uso de tomografía computarizada de rayos-x Alex E. Álvarez. Memorias XIX Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos.

Después de adquirir una *sección*, la posición del objeto en el sentido vertical se modifica con base en una distancia fija predeterminada y los pasos anteriores se repiten nuevamente. Al finalizar el proceso, es posible visualizar y reconstruir el volumen completo utilizando el conjunto de *secciones* del espécimen obtenidas a diferentes alturas. Dependiendo del tamaño del objeto y la precisión deseada, las distancias verticales típicas para tomar secciones varían entre 0,5 mm y 1 mm. La Figura 2-10 presenta ejemplos de *secciones* adquiridas en mezclas asfálticas. Estas imágenes permiten identificar los diferentes elementos que conforman la mezcla (agregados, matriz asfáltica y vacíos) y su distribución real, así como las diferencias que existen en términos de tamaño y proporción de agregados y vacíos en dos tipos diferentes de mezclas asfálticas.

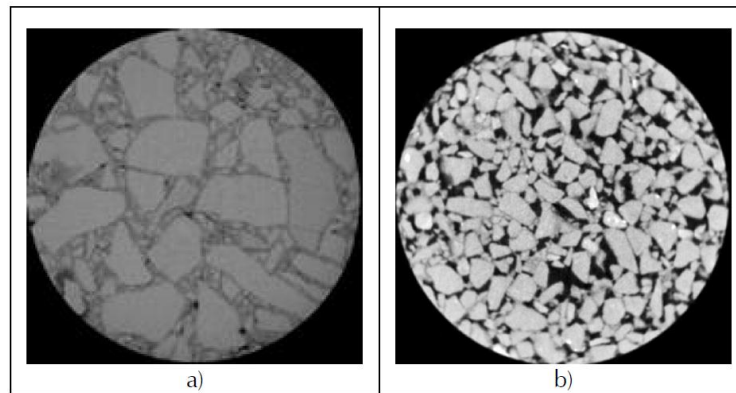


Figura Nº 1-14 Ejemplos de secciones de mezclas asfálticas: (a) de gradación densa, (b) de gradación abierta

El porcentaje de vacíos en cada imagen binaria, P_i , y el total para un espécimen (i.e., contenido total de vacíos), P_{Total} , se calculan como:

$$P_i = \frac{A_{vi}}{A_{Ti}} \quad \text{Ecuación 1-12}$$

$$P_i = \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{N} \quad \text{Ecuación 1-13}$$

Donde A_{vi} corresponde al área de vacíos en cada imagen, A_{Ti} es el área de la sección transversal del espécimen y N es el número de imágenes. El tamaño promedio (i.e., radio) de los vacíos en cada imagen se estima de la siguiente forma:

$$r_i = \sqrt{\frac{A_{vi}}{\pi M_i}} \quad \text{Ecuación 1-14}$$

Donde M_i es el número o cantidad de vacíos en cada imagen.

El proceso de selección del color correspondiente al valor límite es iterativo. Después de asignar al grupo de imágenes un cierto valor límite en escala de grises, se efectúa el cálculo del contenido total de vacíos utilizando las imágenes binarias resultantes (P_{Total}). El valor obtenido de este análisis se compara con el contenido total de vacíos obtenido mediante ensayos de laboratorio. Este proceso se repite hasta que los dos contenidos de vacíos (i.e., calculado y de laboratorio) coincidan.

CAP. III INVESTIGACIÓN SOBRE EL ANÁLISIS DE CONTACTO AGREGADO-AGREGADO EN MEZCLAS DRENANTES EMPLEANDO TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA CON RAYOS-X

1.1 Procedencia de los Materiales Empleados

Los materiales pétreos fueron obtenidos del acopio de la planta de asfaltos ubicada en la comunidad el Molino Cantón Izcayachi municipio El Puente (Ver Figura 3-1). Se utilizará material de grava 3/4", 3/8" y material fino para poder obtener una granulometría combinada que cumpla con la banda granulométrica MD-1 según el artículo 453 de las normas INV de origen colombiano que es el mismo PA-12, huso español.

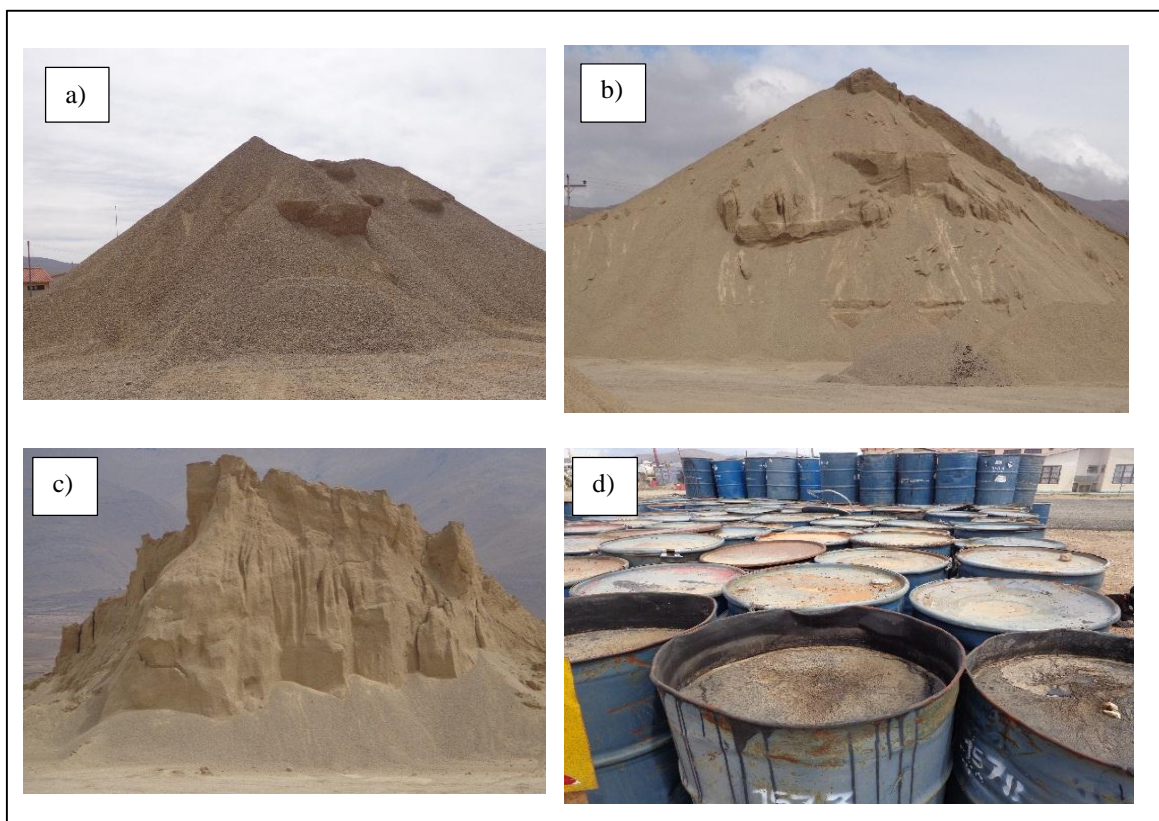


Figura N° 1-1 Acopio de material pétreo en la planta de asfaltos El Molino a) agregado de 3/4" b) agregado 3/8" c) agregado fino d) Asfalto Betupen Plus 85-100.

1.2 Características de los Materiales Empleados

En el capítulo II se detalló las especificaciones técnicas que deben cumplir los materiales para estas mezclas asfálticas, según la norma boliviana.

1.2.1 Ensayos en Ligante Asfáltico

Para caracterizar y evaluar la calidad del ligante asfáltico existen diversos ensayos tradicionales que tratan de reproducir el comportamiento a escala real del material, la importancia del conocimiento de los requisitos y exigencias de calidad del ligante asfáltico tanto por parte del productor, comercializador, transportista, contratista y fiscalizador es de rigor necesario y está supeditado al procedimiento para la aceptación de un ligante asfáltico en trabajos de pavimentación.

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos y se enuncia la norma que los rige.

1.2.1.1 Ensayo de Penetración (ASTM D-5).

La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25°C durante un tiempo de 5 s y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 g.

Equipo

- Penetrómetro.
- Aguja de penetración.
- Recipiente o molde para la muestra.
- Baño de agua María.
- Dispositivo medidor de tiempo.
- Termómetro.
- Espátula
- Asfalto

Procedimiento.

Preparación de la muestra.- Se toma las precauciones necesarias para que la muestra del ensayo sea verdaderamente representativa, de aspecto homogéneo y sin contaminación.

Se separarán con una espátula caliente unos 400 a 500 g de material que se colocarán en un recipiente, que se calienta cuidadosamente agitándolo para evitar sobrecalentamientos locales y para homogeneizar el material, hasta que alcance la fluidez que permita su vertido en los moldes para las probetas. Se preparará un total de dos moldes por cada muestra de material y ensayo de iguales características.

Después de llenar los moldes, se cubren con un vaso de vidrio invertido, de dimensiones apropiadas, para protegerlos del polvo y permitir la eliminación de posibles burbujas de aire, y se dejan enfriar al aire a una temperatura entre 20° y 30°C, (68° y 86°F), por un período entre 1 y 1.5 horas. Finalmente, se sumergen los recipientes en el baño de agua maría a la temperatura de 25 °C (ver figura 3-2), manteniéndolos así durante los mismos períodos de enfriamiento.

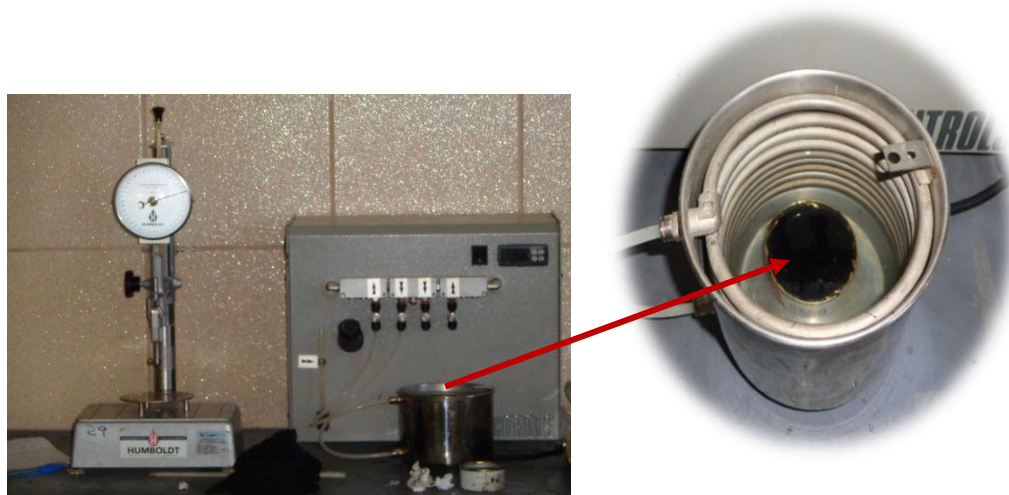


Figura N° 1-2 Ensayo de penetración en muestras de asfalto.

Ejecución del ensayo.- Primero se comprueba que el vástago soporte de la aguja está perfectamente limpio y seco, y que se deslice en forma suave y sin rozamiento sobre su guía. La aguja de penetración se limpia con tolueno u otro disolvente apropiado y se seca con un paño limpio, fijándola firmemente en su soporte.

Una vez transcurridos los tiempos de inmersión, se aproxima la aguja del penetrómetro hasta que su punta toque justamente la superficie de la muestra, sin que penetre. Se anota la lectura o

se pone en cero el penetrómetro y se suelta seguidamente el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo especificado (ver figura 3-3). Finalmente, se lee y anota la distancia, expresada en décimas de milímetro, que haya penetrado la aguja en la muestra.

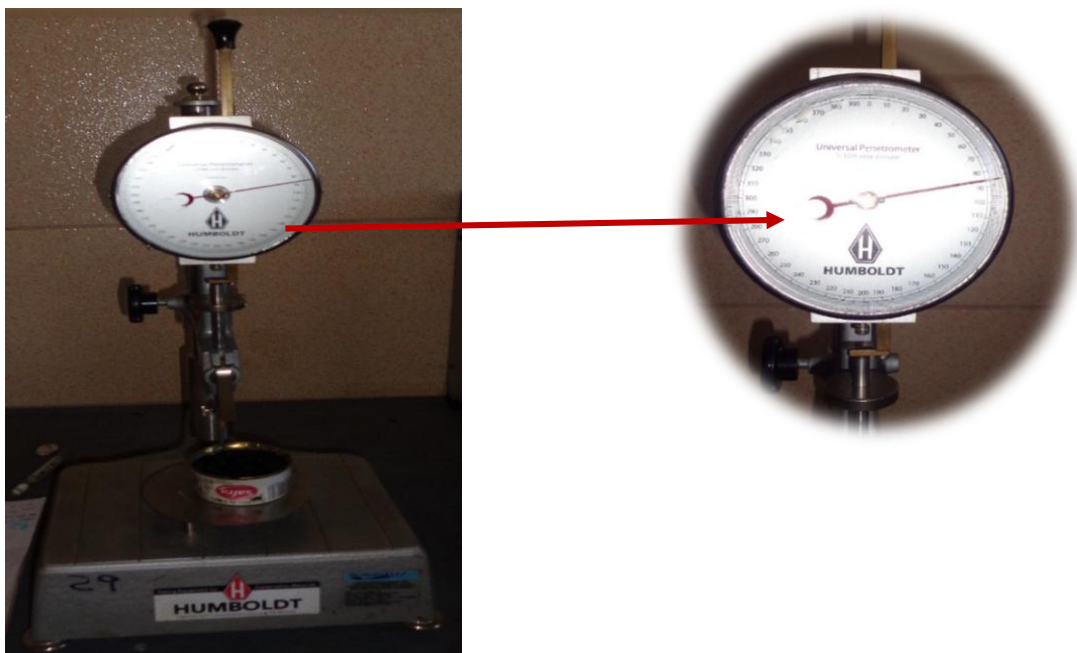


Figura N° 1-3 Penetración en muestras

Se realizaron tres penetraciones en cada recipiente, sobre diferentes puntos de la superficie separados, como mínimo, 10 mm entre sí y de las paredes del recipiente.

Resultados:

MOLDE	PENETRACIÓN N° 1	PENETRACIÓN N° 2	PENETRACIÓN N° 3	PROMEDIO
MOLDEN° 1	87	88	87	87,33
MOLDEN° 2	88	89	89	88,67
				88,00

Tabla 1-1 Resultados de ensayo de penetración¹

¹ Elaboración propia

1.2.1.2 Ensayo de Ductilidad (ASTM D-113).

El ensayo de ductilidad, es la distancia en centímetros que una muestra normalizada de ligante asfáltico puede alargarse antes de que se rompa en dos. La ductilidad es medida en un equipo denominado “ductilómetro” mediante una prueba de “extensión” en donde una probeta de ligante asfáltico es extendida o estirada a una velocidad de 5 Cm/minuto, en un baño de agua de igual densidad y una temperatura $25^{\circ} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Equipo

- Moldes.
- Placa.
- Baño de agua.
- Ductilómetro.
- Termómetro.
- Espátula
- Asfalto

Procedimiento.

Preparación de las probetas.- La placa con el molde se colocan sobre una superficie horizontal, debiendo comprobarse que todas las piezas del molde apoyen completamente sobre la placa.

El material asfáltico se calienta cuidadosamente, agitándolo en cuanto su consistencia lo permita para prevenir los sobrecalentamientos locales, hasta que esté lo suficientemente fluido para verterlo en los moldes.

El llenado en los moldes se hará con cuidado, procurando no distorsionar el correcto montaje de sus piezas, vertiendo el material en forma de chorro fino en un recorrido alternativo de extremo a extremo, hasta que se llene completamente y con un ligero exceso, evitando la inclusión de burbujas de aire.

La probeta, dentro del molde y protegida del polvo, se deja enfriar a temperatura ambiente durante 30 a 40 minutos, sumergiéndola a continuación en el baño de agua a la temperatura de

25°C durante otros 30 minutos. Seguidamente se quita el exceso de material del molde con una espátula recta caliente, hasta dejar la probeta perfectamente enrasada.

Ejecución del ensayo.- La probeta se monta en el ductilómetro, introduciendo cada pareja de clavijas de los sistemas fijo y móvil en los correspondientes orificios de cada pinza, poniendo a continuación en marcha el mecanismo de arrastre del ensayo a la velocidad especificada (ver figura 3-4), hasta que se produzca la rotura midiéndose la distancia en cm que se hayan separado ambas pinzas hasta este instante.

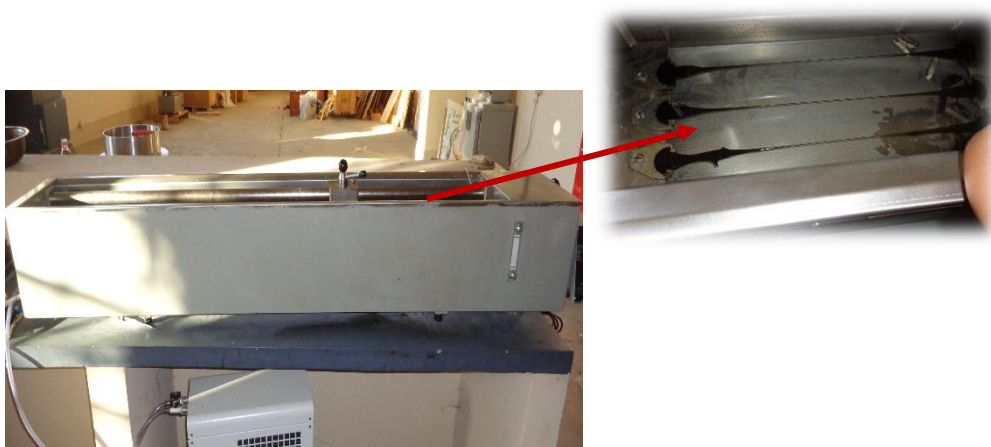


Figura N° 1-4 Muestras estiradas antes de que se rompan.

El material asfáltico entre las pinzas se va paulatinamente estirando hasta formar un hilo, produciéndose la rotura en un punto en el que el hilo no tiene apenas sección transversal.

Resultados:

DATO	PROBETA N° 1	PROBETA N° 2	PROBETA N° 3	PROMEDIO
	cm	cm	cm	cm
MUESTRA N° 1	107,5	108	119	107,75

Tabla 1-2 Resultados de ensayo de ductilidad²

1.2.1.3 Ensayo de Punto de Inflamación (ASTM D-92).

El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El

² Elaboración propia.

punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el ligante asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto.

Equipo

- Aparato de copa abierta Cleveland.
- Termómetro.
- Asfalto

Procedimiento:

Llenar la copa a cualquier temperatura que no exceda de 100°C (180°F) por encima del punto de ablandamiento de la muestra de tal manera que la parte superior del menisco quede en la línea de llenado(ver figura 3-5), encender la llama de ensayo y ajustar el diámetro .

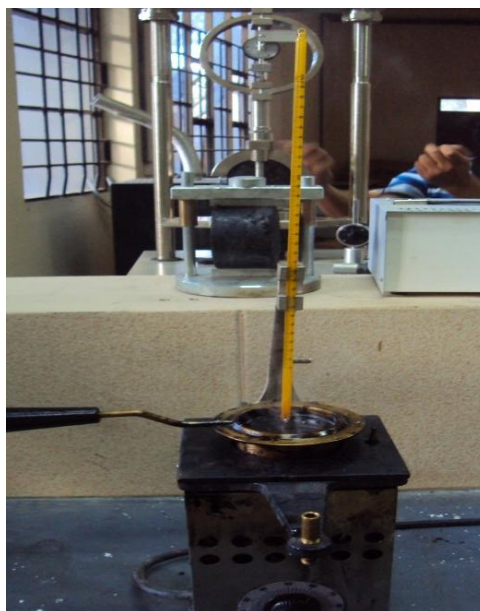


Figura Nº 1-5 Ejecución del ensayo punto de inflamación

Se aplica calor inicialmente de tal manera que la rata de incremento de temperatura de la muestra sea de 14 a 17°C (25 a 30°F) por minuto. Cuando la temperatura de la muestra sea de aproximadamente 56°C (100°F) por debajo del punto de llama esperado, se disminuye el calor

de manera que la temperatura se aumente, para los últimos 28°C (50°F) antes de llegar al punto de inflamación, en 5 a 6°C (9 a 11°F) por minuto.

Por lo menos a 28°C (50°F) bajo el punto de inflamación, se empieza a aplicar la llama de ensayo, una vez por cada aumento de 2°C (5°F). Pasar la llama de ensayo a través del centro de la copa.

Se registra como punto de inflamación, la lectura de temperatura sobre el termómetro cuando aparezca una llama en cualquier punto sobre la superficie. No debe confundirse la llama verdadera con el halo azulado que algunas veces rodea la llama de ensayo

Resultados

PUNTO DE INFLAMACIÓN	TEMPERATURA °C
MUESTRA N° 1	253

Tabla 1-3 Resultado de ensayo de punto de inflamación³

1.2.1.4 Ensayo de Viscosidad Saybolt-Furol (ASTM E-102).

Este ensayo se emplea normalmente para cementos asfálticos, emulsiones y aceites y sirve para determinar el tiempo en segundos, necesarios para que pasen 60 centímetros cúbicos de líquido, a una temperatura determinada, a través de un tubo de dimensiones específicas.

En esta investigación al tratarse de un cemento asfáltico se determinara a una temperatura de 135 °C.

Equipo

- Viscosímetro Saybolt.
- Frasco calibrado para recibir la muestra de 60 cm³.
- Termómetros.
- Cronómetro A ± 1s.
- Pipeta de 2mm de diámetro interior.

³ Elaboración propia.

Procedimiento.

Se comienza el ensayo limpiando perfectamente el recipiente con un disolvente eficaz, por ejemplo, gasolina, teniendo cuidado de que no quede disolvente en el interior del cilindro.

Se hace pasar la muestra a través de un tamiz # 100 antes de echarla en el recipiente. Se echa en el recipiente ya limpio una cantidad de muestra que sea suficiente para mojar completamente su superficie dejando que fluya el exceso. Se coloca el tapón en la parte inferior del tubo de salida, de manera que quede introducido más de 6.3 mm. y menos de 9.5 mm. El tapón debe entrar suave, pero haciendo un cierre hermético para evitar que se escape el aire de la parte inferior del recipiente.

Si la temperatura a la que se va a realizar el ensayo es superior a la del ambiente, se calentará la muestra a una temperatura de 1 ó 2 grados por encima de la del ensayo y, si es inferior se enfriará la muestra a 1 ó 2 grados por debajo de la temperatura a la que se va a ensayar. En ningún caso se calentará la muestra a una temperatura superior a 27,8 ° C por debajo de su punto de inflamación.

Se vierte la muestra en el tubo hasta que deja de rebosar dentro del cilindro de rebose tras lo cual se mantendrá bien revuelta por medio del termómetro. La temperatura del baño se debe graduar hasta que la temperatura de la muestra dentro del tubo sea constante.

Después que la temperatura de la muestra ha permanecido constante con un error de ± 0.05 ° C durante un minuto con agitación constante se saca el termómetro se limpia el exceso de muestra del cilindro de rebose por medio de la pipeta, pero teniendo cuidado de no golpear el rebosadero. En caso de que éste sea golpeado, se deberá recoger el ensayo. La punta de la pipeta deberá mantenerse en un punto fijo dentro del cilindro de rebose y en ningún caso se removerá el exceso de muestra rotando la pipeta alrededor de aquel.

Se coloca el frasco calibrado de 60 cm³ en una posición tal que quede centrado con respecto al orificio de salida y que el material al fluir no toque las paredes del frasco. La graduación quedará situada a una distancia comprendida entre 10 y 13 cm. respecto del fondo del baño.

El ensayo se empieza sacando rápidamente el tapón del corcho del tubo, poniendo en marcha al mismo tiempo el cronómetro Se para el cronómetro cuando la parte inferior del menisco alcanza la graduación del cuello del frasco calibrado.

Resultado: El tiempo transcurrido entre el instante en el que se sacó el corcho y el instante en que el menisco de la muestra alcanzó la marca de calibración, en segundos, es de 125, a la temperatura de 135°C.

1.2.1.5 Ensayo de Peso Específico (ASTM D-70).

El peso específico de un material a la relación de su peso en el aire a una temperatura dada, al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura, a los 25°C.

Equipo

- Picnómetro.
- Baño de agua.
- Termómetro.
- Recipiente de vidrio boca ancha de 600ml.
- Balanza A \pm 0.01gr.
- Agua destilada.
- Asfalto.

Procedimiento.

Calibración del picnómetro.- Se limpia perfectamente el picnómetro y su tapón con el líquido de limpieza, enjuagándolo a continuación con agua destilada y secándolo finalmente. Esta operación de limpieza debe realizarse antes de cada calibración, o bien cuando se observe cualquier falla en el escurrimiento uniforme de los líquidos, en las paredes interiores del picnómetro o en el capilar del tapón.

Después de secado, se deja que el picnómetro alcance la temperatura ambiente y se pesa con aproximación de 1 mg. El peso del picnómetro vacío, se designa por A.

Se seca el vaso del baño y se llena el picnómetro con agua destilada, colocando suavemente el tapón, sin apretarlo. Se sumerge completamente el picnómetro en el vaso y se aprieta entonces el tapón, no debiendo quedar burbujas de aire ocluidas en el picnómetro en esta operación. El vaso con el picnómetro se vuelve a colocar en el baño de agua a 25 °C.

Se deja el picnómetro en el interior del vaso por un mínimo de 30 minutos, se saca del agua e inmediatamente se seca la superficie superior del tapón pasando suavemente y una sola vez un paño seco por la misma; a continuación, se seca rápidamente el resto del picnómetro y se pesa con aproximación de 0.1 mg. El peso del picnómetro lleno de agua, se designa por B.

Preparación de la muestra.- Calentar con cuidado la muestra, agitándola para evitar sobrecalentamientos locales hasta que llegue a ser suficientemente fluida para que pueda ser vertida. La muestra debe ser representativa de la existente en el laboratorio y deberá ser homogénea y no estar contaminada.

Verterlo una cantidad de muestra suficiente dentro del picnómetro limpio y seco previamente calentado, llenándolo hasta tres cuartos de su capacidad. Tomar precaución para evitar que el material se ponga en contacto con las paredes del picnómetro por encima del nivel final y para evitar la inclusión de burbujas de aire. Dejar enfriar el picnómetro con su contenido hasta la temperatura ambiente durante un período no menor de 40 minutos y pesar con el tapón (ver figura 3-6), con aproximación a 1 mg. El peso del picnómetro con la muestra, se designa como C.



Figura Nº 1-6 Ejecución del ensayo peso específico del ligante

Llenar el picnómetro que contiene el asfalto con agua destilada, colocando firmemente el tapón en el picnómetro. No deben permitirse burbujas de aire en el picnómetro. Colocar el picnómetro en el vaso y apretar firmemente el tapón. Retornar luego el vaso al baño de agua a 25° C.

Mantener el picnómetro dentro del baño de agua durante un período no menor de 30 minutos. Sacar y pesar, este peso del picnómetro con la muestra y con agua, se designa como D.

Resultados:

PESO DEL PICNOMETRO LLENO DE AGUA	(B)	69,93
PESO DEL PICNOMETRO SOLO	(A)	36,46
	(B-A)	33,47
PESO DEL PICNOMETRO + CEMENTO ASFALTICO	(C)	59,10
	(C-A)	22,64
PESO DEL PICNOMETRO + CEMENTO ASFALTICO + AGUA PARA LLENAR EL PICNOMETRO	(D)	70,08
	(D-C)	10,98
	(B-A) - (D-C)	22,49
GRA VEDAD ESPECIFICA	(C-A)/((B-A) - (D-C))	1,007

Tabla 1-4 Gravedad especifica del ligante asphaltico⁴

De los ensayos realizados se tiene los siguientes resultados, los mismos que son comparados con su respectiva especificación exigida por la norma (ver Tabla 5). Observándose que todos y cada uno de los ensayos realizados cumplen con los requerimientos.

BETUPEN PLUS 85-100				
ENSAYOS	MINIMO	MAXIMO	RESULTADO	NORMA
Viscosidad a 135°C Saybolt-Furol, SSF.	100	-----	125	ASTM E- 102
Penetración (25 °C, 100gr, 5s)mm/10	85	100	88	ASTM D-5
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min), cm	100	-----	107,5	ASTM D-113
Punto de inflamación, Copa Cleveland, °C	232	-----	253	ASTM D-92
Gravedad especifica			1,007	ASTM D-70

Tabla 1-5 Resultados obtenidos comparación con especificaciones⁵

1.2.2 Ensayos en los Agregados

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos y se enuncia la norma que los rige. Los resultados obtenidos y la comparación con las especificaciones.

1.2.2.1 Abrasión de Agregado Grueso Maquina de los Ángeles (ASSHTO T-96).

Este ensayo se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la citada máquina con una carga abrasiva.

⁴ Elaboración propia.

⁵ Elaboración propia.

Equipo

Balanza A \pm 0.1 gr.

- Horno.
- Tamices (3/4", 1/2", 3/8" y N°12).
- Máquina de los Ángeles.
- Esferas de acero de diámetro 46.38mm y peso 390gr.
- Agregado grueso de la planta de asfaltos el Molino.

Procedimiento.

La muestra de ensayo consiste en agregado limpio por lavado y secado en horno a una temperatura constante, separada por fracciones de cada tamaño y recombinadas con una de las granulometrías indicadas en la Tabla No.2. El tipo de abrasión que se realizara será de tipo C. La muestra antes de ensayarla será pesada con aproximación de 1 g.

La muestra y la carga abrasiva correspondiente, se colocan en la máquina de Los Ángeles (ver figura 3-7), y se hace girar el cilindro a una velocidad comprendida entre 188 y 208 rad/minuto (30 y 33 r.p.m.); el número total de vueltas será 500. La máquina deberá girar de manera uniforme para mantener una velocidad periférica prácticamente constante.



Figura N° 1-7 Desgaste en la Máquina de los Ángeles

Una vez cumplido el número de vueltas prescrito, se descarga el material del cilindro y se procede con una separación preliminar de la muestra ensayada, en un tamiz más grueso que el de 1.70 mm (No.12). La fracción fina que pasa, se tamiza a continuación empleando el tamiz de 1.70 mm (No.12). El material más grueso que el tamiz de 1.70 mm (No.12) se lava, se seca en el horno, a una temperatura comprendida entre 105 a 110°C (221 a 230°F), y se pesa con precisión de 5000 g.

Resultados:

PASADO	RETENIDO	CANTIDAD TOMADA (gr)
3/8	1/4	2500
1/4	4	2500
RETENIDO TAMIZ DE CORTE N° 12 (1,7 mm)		3761

DIFERENCIA	1239
------------	------

$Desgaste = \frac{Diferencia}{5000} * 100$	24,78%
--	--------

Tabla 1-6 Porcentaje de desgaste en la Maquina de los Ángeles⁶

1.2.2.2 Peso Específico Agregado Fino (ASSTHO T-84)

Este ensayo tiene como objetivo la determinación del peso específico aparente, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

El peso específico aparente es la relación entre el peso al aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente.

Equipo

- Balanza A ± 0.01 gr.
- Tamiz N° 4.

⁶ Elaboración propia.

- Matraz aforado.
- Molde cónico.
- Varilla para apisonado.
- Bandeja de zinc.
- Baño de agua.
- Agregado fino de la planta de asfaltos el Molino.

Procedimiento.

Se debe primeramente homogeneizar completamente la muestra y eliminar el material de tamaño superior a 4.75 mm (tamiz No.4), se selecciona, por cuarteo, una cantidad de aproximadamente 1000 g, que se seca en el horno a 100 - 110°C, se enfría luego al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas. Una vez fría se pesa, repitiendo el secado hasta lograr peso constante. A continuación se cubre la muestra completamente con agua y se la deja así sumergida durante 24 ± 4 horas.

Después del período de inmersión, se decanta cuidadosamente el agua para evitar la pérdida de finos y se extiende la muestra sobre una bandeja, comenzando la operación de desecar la superficie de las partículas, dirigiendo sobre ella una corriente moderada de aire caliente, mientras se agita continuamente para que la desecación sea uniforme, y continuando el secado hasta que las partículas puedan fluir libremente.

Para fijar este punto, cuando se empiece a observar visualmente que se está aproximando el agregado a esta condición, se sujeta firmemente el molde cónico con su diámetro mayor apoyado sobre una superficie plana no absorbente, echando en su interior a través de un embudo y sin apelmazar, una cantidad de muestra suficiente, que se apisona ligeramente con 25 golpes de la varilla levantando a continuación, con cuidado, verticalmente el molde. Si la superficie de las partículas conserva aún exceso de humedad, el cono de agregado mantendrá su forma original, por lo que se continuará agitando y secando la muestra, realizando frecuentemente la prueba del cono hasta que se produzca un primer desmoronamiento superficial indicativo de que finalmente ha alcanzado el agregado la condición de superficie seca.

Inmediatamente, se introducen en el picnómetro previamente tarado, 500.0 g del agregado fino, y se le añade agua hasta aproximadamente un 90 por ciento de su capacidad; para eliminar el aire atrapado se rueda el picnómetro sobre una superficie plana e incluso agitando o invirtiéndolo si es preciso, introduciéndolo seguidamente en un baño de agua a una temperatura de 25°C durante 1 hora, transcurrida la cual se enrasa con agua a igual temperatura, se saca del baño, se seca rápidamente su superficie y se determina su peso total (picnómetro, muestra y agua con una aproximación de 0.1 g.

Resultados:

MEZCLA < N° 4

DESCRIPCION	UNIDAD	1	2		PROMEDIO
Peso Frasco Seco y Vacío (u)	grs	158,0	158,0		
Peso Frasco + grs Muestra(f)	grs	458,0	458,0		
Peso Muestra Saturada de Superficie Seca	grs	300,0	300,0		
Peso Muestra Seca (a=f-u)	grs	290,6	291,0		
Peso Frasco + Agua (t)	grs	657,8	657,8		
Peso Frasco + Muestra + Agua (b)	grs	840,8	840,6		
Volumen Frasco (t-u)	cm ³	499,8	499,8		
Peso Espec. del Agreg. Seco	grs/cm ³	2,484	2,483		2,483
P. E. A. Saturado Sup. Seca	grs/cm³	2,564	2,560		2,562
Peso Específico Aparente (BULK) (a/ (t+a-b))	grs/cm ³	2,701	2,689		2,695
% de Absorción	%	3,2	3,1		3,2

Tabla 1-7 Determinación del peso específico del agregado fino⁷

1.2.2.3 Peso Específico y Absorción Agregado Grueso (AASHTO T-85)

Este ensayo sirve para determinar los pesos específicos aparente y nominal, así como la absorción, después de 24 horas de sumergidos en agua, de los agregados con tamaño igual o mayor a 4.75 mm (tamiz No.4)

Equipo

- Balanza A \pm 0.01 gr.
- Tamiz No.4.

⁷ Elaboración propia.

- Canastilla metálica.
- Dispositivo de suspensión.
- Agregado grueso de la planta de asfaltos el Molino.

Procedimiento.

Se comienza por mezclar completamente el agregado, cuarteándolo a continuación, hasta obtener aproximadamente la cantidad mínima necesaria para el ensayo, después de eliminar el material inferior a 4.75 mm. en este caso al tener un tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ pulg, la cantidad de la muestra es de 3kg.

La muestra se lava inicialmente con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas; se seca a continuación en un horno a 100° - 110°C y se enfría al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas. Una vez fría se pesa, repitiendo el secado hasta lograr peso constante, y se sumerge en agua, también a temperatura ambiente, durante 24 ± 4 horas.

Después del período de inmersión, se saca la muestra del agua y se secan las partículas rodándolas sobre un paño absorbente de gran tamaño, hasta que se elimine el agua superficial visible, secando individualmente los fragmentos mayores. Se tomarán las precauciones necesarias para evitar cualquier evaporación de la superficie de los agregados. A continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturada con superficie seca (S.S.S.).

A continuación, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergida en el agua, a la temperatura de 25°C.

La canastilla y la muestra deberán quedar completamente sumergidas durante la pesada y el hilo de suspensión será lo más delgado posible para que su inmersión no afecte a las pesadas.

Se seca entonces la muestra en horno a 100° - 110°C, se enfría al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas y se determina su peso seco hasta peso constante.



Figura N° 1-8 Muestra saturada y Peso sumergido de la muestra

Resultados:

GRAVA MEZCLA > N°4

DESCRIPCION	UNIDAD	1	2	3	PROMEDIO
Peso Muestra Saturada de Superf. Seca (e)	[grs.].	2477,2	2073,0	2073	
Peso Material Seco (f)	[grs.].	2435,4	2040,2	2040,2	
Peso Muestra + Cesto suspendido en Agua	[grs.].	2720,6	2474,2	2474,2	
Peso del Cesto suspendido en Agua	[grs.].	1205,2	1205,2	1205,2	
Peso Muestra suspendida Agua (g)	[grs.].	1515,4	1269,0	1269	
Peso Específico del Agregado Seco (f / (e-g))	[grs/cm³]	2,532	2,538	2,538	2,535
P. E. A. Saturado de Superficie Seca (e/(e-g))	[grs/cm³]	2,576	2,578	2,578	2,577
Peso Específico Aparente (f/ (f-g))	[grs/cm³]	2,647	2,645	2,645	2,646
% de Absorción ((e-f)/f)* 100	[%]	1,716	1,608	1,608	1,662

Tabla 1-8 Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso⁸

1.3 Ensayos Sobre la Mezcla Asfáltica.

1.3.1 Granulometría y Mezcla de Agregados.

1.3.1.1 Granulometría

⁸ Elaboración propia.

El análisis granulométrico de un material tiene por objeto separar y clasificar los gránulos de que está formado según su tamaño, esta separación se hace mediante una colección de tamices de malla cuadrada.

Equipo

- Balanza A \pm 0.01 gr.
- Tamices de malla cuadrada (3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°10, N°40, N°200.)
- Bandejas metálicas.
- Cepillo de acero.
- Brocha.
- Agregado fino del acopio planta de asfaltos El Molino.
- Agregado grueso del acopio planta de asfaltos El Molino.

Procedimiento.

Granulometría agregado Grueso planta de asfaltos El Molino.

Primeramente se efectúa un muestreo para el agregado grueso mediante el cuarteo (ver figura 3-9), que consiste en colocar a la muestra en el separador para obtener una muestra representativa que abarque el mayor tamaño de partículas.

La muestra escogida de agregado grueso se coloca en una bandeja para determinar la masa de la bandeja y la muestra.



Figura N° 1-9 Cuarteador de muestras

Tomamos la muestra, se coloca sobre la torre de cedazos conformado por los tamices de 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°10, N°40, N°200, (ver figura 3-10) inmediatamente con movimientos circulares facilitamos que las partículas puedan retenerse o pasar en cada uno de los tamices. Los resultados del ensayo se dan en porcentajes del peso total del material que pasa cada tamiz de dimensiones conocidas, para lo cual se pesan las respectivas cantidades retenidas y sumadas en forma acumulativa a las anteriores de tamaño mayor, estos pesos acumulados se divide para el peso total de la muestra ensayada y se multiplica por 100. La diferencia a 100 de cada uno de estos porcentajes acumulados nos da el porcentaje que deja pasar el tamiz correspondiente.



Figura N° 1-10 Serie de Tamices Utilizados

Este procedimiento se realizó para los tres tipos de agregados $\frac{3}{4}$, $\frac{3}{8}$ y agregado fino que se tiene en la planta de asfaltos El Molino los resultados de las granulometrías individuales se dan en la tabla 3-9 ver en anexo 1 ensayo completo.

MATERIALES COMPONENTES PARA LA ELABORACION DE BRIQUETAS									
Peso Suelo Seco [Grs.]	1785		1200,8			1091,8			
Tamiz	Grava de 3/4"		Grava de 3/8"			Fino		Abertura Tamiz	
Nº	Peso Ret.	% Que Pasa	Peso Ret.	% Que Pasa		Peso Ret.	% Que Pasa	[mm.]	
2"	0,0	100,0	0,0	100,0		0,0	100,0	50,80	
1 1/2"	0,0	100,0	0,0	100,0		0,0	100,0	38,10	
1"	0,0	100,0	0,0	100,0		0,0	100,0	25,40	
3/4"	0,0	100,0	0,0	100,0		0,0	100,0	19,05	
1/2"	982,8	44,9	6,2	99,5		0,0	100,0	12,70	
3/8"	1291,4	27,7	28,2	97,7		12,2	98,9	9,53	
N° 4	1628,8	8,8	776,6	35,3		61,6	94,4	4,75	
N° 10	1710,8	4,2	1133,0	5,6		421,8	61,4	2,00	
N° 40	1731,6	3,0	1150,6	4,2		682,2	37,5	0,42	
N° 80	1737,6	2,7	1154,6	3,8		780,2	28,5	0,16	
N° 200	1755,0	1,7	1167,8	2,7		906,2	17,0	0,08	

Tabla 1-9 Granulometrías individuales de los agregados⁹

1.3.1.2 Mezcla de Agregados.

Después de obtener la granulometría de cada uno de los materiales se procede a mezclarse y calcular el porcentaje que se precisa de cada uno para obtener una granulometría deseada.

En la presente investigación se realizará la mezcla de agregados con tres tipos de materiales, para la cual se ha determinado que la faja granulométrica para la realización de la mezcla asfáltica drenante.

TAMIZ ASTM	TAMIZ (mm)	MD-1*	
		ESP. INF	ESP. SUP
3/4"	19.00	100	100
1/2"	12.50	70	100
3/8"	9.50	50	75
Nro 4	4.75	15	32
Nro 10	2.00	9	20
Nro 40	0.43	5	12
Nro 200	0.08	3	7

Tabla 1-10 Franja Granulométrica para Mezclas Drenantes¹⁰

Esta faja se la eligió en consideración a la norma Española y norma Colombiana mostradas en la tabla 3-10, con lo cual se estableció que la mezcla de agregados estará compuesta por grava

⁹ Elaboración propia.

¹⁰ Tabla 453.1 Franja granulométrica para mezclas drenantes. Artículo 453-01, normativa INVIAS Colombia

3/4" con 35%, grava 3/8" con 55%, fino con filler con 10% para la granulometría de la mezcla, estos resultados se puede observar en la Tabla 3-11.

MALLA		% QUE PASA		
ASTM	mm	Combinada	MD-1	
			Mínimo	Máximo
3/4"	19.00	100%	100.00	100.00
1/2"	12.50	79.61%	70.00	100.00
3/8"	9.50	71.58%	50.00	75.00
Nro 4	4.75	30.19%	15.00	32.00
Nro 10	2.00	11.11%	9.00	30.00
Nro 40	0.43	6.67%	5.00	12.00
Nro 200	0.08	3.70%	3.00	7.00

Tabla 1-11 Granulometría del material combinado¹¹

Las especificaciones de granulometría de la mezcla de los agregados, para esta investigación se presentan en el gráfico 1.

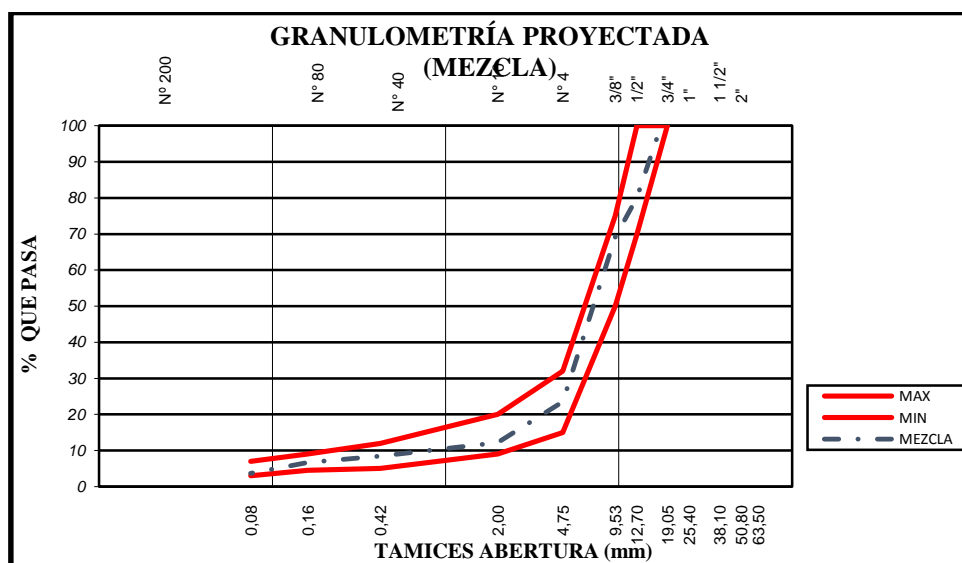


Gráfico 1 Análisis granulométrico de la mezcla de agregados ¹²

En el gráfico anterior los tamaños de los tamices se muestran en el eje de las abscisas en pulgadas, el porcentaje del material que pasa se muestra en el eje de las ordenadas. Las especificaciones para esta investigación son las dadas por la norma colombiana INVIAS, y están

¹¹ Elaboración propia.

¹² Elaboración propia

representadas por la región que está entre líneas sólidas delgadas. La mezcla de diseño está representada por la línea entrecortada.

1.4 Diseño de la Mezcla Asfáltica Drenante o Porosa

En lo que respecta al diseño de mezclas drenantes, la normativa ABC, en su apartado sobre mezclas drenantes, establece que este se realizara a partir de probetas cilíndricas del tipo Marshall elaboradas de acuerdo a los procedimientos establecidos en la misma, similar a la norma AASHTO.

Para la selección del contenido óptimo de asfalto en la mezcla se establecen los siguientes 5 criterios:

1. Los vacíos con aire de la mezcla compactada, medidos de acuerdo al procedimiento establecido ASTM T 269, no deberán ser inferiores a veinte por ciento (16%), ni mayores de veinticinco por ciento (25 %).
2. Para asegurar que los vacíos con aire están debidamente interconectados, se realizará una prueba de permeabilidad. La capacidad de drenaje se medirá colocando cien mililitros (100 ml) de agua en un molde conteniendo la probeta pre humedecida. El tiempo que tarde el agua en atravesar la muestra no deberá exceder de quince segundos (15 s).
3. Las pérdidas por desgaste a veinticinco grados Celsius (25°C), determinadas de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma AASHTO T-96, no deberán ser superiores a veinticinco por ciento (25 %).
4. La dosificación del material bituminoso no podrá ser inferior a cuatro y medio por ciento (4.5 %), respecto del peso seco de los agregados, incluido el llenante mineral.
5. Se deberá comprobar, además, la adhesividad entre el agregado y el ligante, Al efecto de la pérdida por abrasión en el ensayo Cántabro, según la norma.

Con lo anterior, se establece que los parámetros a evaluar son los siguientes:

- Vacíos en la mezcla
- Desgaste en la máquina de los ángeles (estado seco)
- Permeabilidad

1.5 Preparación y Fabricación de Briquetas

Las mezclas drenantes se diseñan a partir de briquetas cilíndricas tipo Marshall, confeccionadas como se describe en la norma Colombiana de ensayo INV E – 760 “Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste”. En general, el número mínimo de briquetas para fabricar es de tres por cada mezcla. En este caso se realizaran tres diseños Marshall (faja inferior “A”, media “B” faja superior “C”) cada diseño con cinco contenidos de asfalto y cinco briquetas por cada contenido de asfalto.

Equipo

- Compactadora mecánica de briquetas.
- Martillo de compactación.
- Dispositivo para moldear probetas.
- Extractor de probetas.
- Balanza eléctrica $A \pm 0.01$ gr.
- Bandejas metálicas.
- Placa de calentamiento.
- Termómetro blindado.
- Espátula.
- Medidor de la estabilidad.
- Mezcla de agregados
- Asfalto.

1.5.1 Preparación de las Muestras

El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de 101.6mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2½") de altura, preparadas como se describe en la norma.



Figura N° 1-11 Briquetas de estudio

1.5.1.1 Cálculo de Materiales Diseño Marshall

Se realizó la dosificación de agregados para cada briqueta que cumple con la franja granulométrica de especificaciones el cálculo de materiales se presenta en la siguiente tabla:

FAJA GRANULOMÉTRICA SUPERIOR "A"																							
CALCULO DE MATERIALES DISEÑO MARSHALL																							
Tamiz				% C.A.	PST	PSA		% C.A.	PST	PSA		% C.A.	PST	PSA		% C.A.	PST	PSA		% C.A.	PST	PSA	
Pasa	Retiene	% P	% R	3,5	1200,0	1158,0		4,0	1200,0	1152,0		4,5	1200,0	1146,0		5,0	1200,0	1140,0		5,5	1200,0	1134,0	
				PA (1)	PP (1)	PA(2)	PA(2)	PA(1)	PA (1)	PP (2)	PA(2)	PA(1)	PA (1)	PP (2)	PA(2)	PA(1)	PA (1)	PP (2)	PA(2)	PA(1)	PA (1)	PP (2)	PA(2)
2"	1 1/2"	100	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1 1/2"	1"	100	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1"	3/4"	100	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/4"	1/2"	100	30	347,4	347,4	347,4	347,4	345,6	345,6	345,6	345,6	343,8	343,8	343,8	343,8	342,0	342,0	342,0	342,0	340,2	340,2	340,2	340,2
1/2"	3/8"	70	20	231,6	579,0	231,6	579,0	230,4	576,0	230,4	576,0	229,2	573,0	229,2	573,0	228,0	570,0	228,0	570,0	226,8	567,0	226,8	567,0
3/8"	N° 4	50	35	405,3	984,3	405,3	984,3	403,2	979,2	403,2	979,2	401,1	974,1	401,1	974,1	399,0	969,0	399,0	969,0	396,9	963,9	396,9	963,9
N° 4	N° 10	15	6	69,5	1053,8	69,5	1053,8	69,1	1048,3	69,1	1048,3	68,8	1042,9	68,8	1042,9	68,4	1037,4	68,4	1037,4	68,0	1031,9	68,0	1031,9
N° 10	N° 40	9	4	46,3	1100,1	46,3	1100,1	46,1	1094,4	46,1	1094,4	45,8	1088,7	45,8	1088,7	45,6	1083,0	45,6	1083,0	45,4	1077,3	45,4	1077,3
N° 40	N° 80	5	1	11,6	1111,7	57,9	1158,0	11,5	1105,9	57,6	1152,0	11,5	1100,2	57,3	1146,0	11,4	1094,4	57,0	1140,0	11,3	1088,6	56,7	1134,0
N° 80	N° 200	4	1	11,6	1123,3			11,5	1117,4			11,5	1111,6			11,4	1105,8			11,3	1100,0		
N° 200	Fondo	3	3	34,7	1158,0			34,6	1152,0			34,4	1146,0			34,2	1140,0			34,0	1134,0		
0,0			0	0,0				0,0				0,0				0,0				0,0			
Suma Total				1158,0		1158		1152,0		1152		1146,0		1146		1140,0		1140		1134,0		1134	
Cemento Asfáltico				42,0				48,0				54,0				60,0				66,0			

Tabla 1-12 Cálculo de materiales diseño Marshall

Donde:

%CA: Porcentaje de cemento asfáltico.

PST: Peso total de la mezcla.

PSA: Peso total del agregado.

PA1: Peso agregados retenidos parciales.

PA2: Peso Agregados retenidos parciales. En el tamiz pasa N° 40 se acumula hasta el retenido en el fondo.

PP1: Peso Agregados retenidos Acumulados.

Ver en anexo 1 el cálculos de materiales para la faja “B” y faja “C”.

Una vez obtenido el cálculo de materiales se procede a pesar en platos separados para cada briqueta de ensayo, la cantidad necesaria de cada fracción de agregado para producir una muestra que dé como resultado una briqueta compacta, normalmente se requieren 1200 g.



Figura N° 1-12 Pesado del agregado para la mezcla

Colocar a continuación el recipiente al horno para calentar la dosificación de agregados a una temperatura de 150 °C.

Colocar la cantidad de asfalto necesaria para la fabricación de las probetas en un recipiente y se llevó a una temperatura de 160 °C, esto de acuerdo a las propiedades del asfalto utilizado (BETUPEN PLUS 85-100) cuya temperatura de mezclado y compactación a utilizar es de 130°C y 147°C respectivamente.



Figura Nº 1-13 Colocado del agregado a una temperatura de 150 °C

Se vertieron los agregados en el recipiente para el mezclado y se efectuó una mezcla de los mismos añadiendo la cantidad necesaria de cemento asfáltico para la mezcla. En este instante las temperaturas del árido y del asfalto deben estar dentro de los límites establecidos, el asfalto no debe mantenerse a la temperatura de mezclado por más de una hora antes de usarlo.



Figura Nº 1-14 Pesaje del contenido de asfalto de la mezcla

Se mezcla el árido con el asfalto tan rápido como sea posible hasta que la mezcla quede totalmente cubierta y uniforme.



Figura N° 1-15 Mezclado del asfalto con los agregados.

1.5.1.2 Compactación de las Briquetas

Se preparó el molde y el martillo, limpiando completamente el conjunto del molde y cara del martillo de compactación, el molde debe de estar previamente calentado antes de colocar la mezcla en el fondo del molde debe encontrarse un papel parafinado que evitará que la mezcla se pegue al martillo compactador, luego se coloca el conjunto collar, molde y base en el pedestal del compactador.



Preparación del molde de la briqueta con papel parafinado para su posterior llenado del mismo.

Figura N° 1-16 Preparación del molde y colocado de la mezcla.

Para la compactación es utilizado un martillo Marshall formado por una masa de compactación de 3.96 ± 20 g de masa y un pisón de 4.55 ± 20 g montado de forma que se pueda conseguir una caída libre del mismo sobre la base desde una altura de 460 ± 3 mm. Según la norma NLT 159, el martillo compactador debe tener las dimensiones mostradas en la figura x.

Se llenó el molde con una espátula, acomodando la mezcla en el perímetro y el centro, la temperatura antes de compactar debe estar en los límites establecidos.

Con el martillo de compactación se aplicó 50 golpes en un tiempo no superior a 90 segundos. Se saca la base y el collar se invierte y se reensambla el molde, se aplicó en la otra cara el mismo número de golpes en un tiempo no mayor al indicado.



Figura Nº 1-17 Compactación de la mezcla.

Inmediatamente después de compactada la briqueta, debe ser removida el papel parafinado, y se espera un tiempo mínimo de 2 horas antes de extraerla del molde.



Figura N° 1-18 Extracción de briquetas del molde

Una vez que se extrajo las briquetas del molde se procedió a numerarlas cada una de ellas.



Figura N° 1-19 Briquetas de estudio

1.5.2 Peso y Volumen de las Briquetas

Después de ser desmoldadas las briquetas se procede a tomar el peso de cada una de las briquetas a través de una balanza de 0.1 g de precisión y cuatro medidas de diámetro y cuatro medidas de altura de las briquetas tomadas por medio de un Vernier.



Figura Nº 1-20 Pesado de briquetas en aire y sumergido

Las medidas son necesarias para que con el promedio sea obtenido el volumen de la briqueta. Se muestra en la tabla 3-13 los volúmenes y pesos de las briquetas ensayadas.

1.5.3 Densidad Bulk

Se determinó la densidad bulk, de la mezcla asfáltica compactada, a partir de su masa seca (en gr) y de su volumen (en cm³) y se promediaron los resultados.

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \quad \text{Ecuación 1-1}$$

$$\text{Densidad aparente} = \frac{Pa}{Pa - Pag} \quad \text{Ecuación 1-2}$$

Donde:

Pa: Peso de la briqueta en el aire en gramos

DENSIDAD

Tal como establece el procedimiento, se midió la altura de la briqueta con especial cuidado y precisión; así mismo, se midió su diámetro en cuatro sitios diferentes y se calculó su promedio.

Se calculó el volumen de la muestra de forma “geométrica” con base en la altura promedio y en la medida del diámetro, mediante la siguiente expresión para el cálculo de volumen de un cilindro.

$$V_{\text{cilindro}} = \frac{\pi D^2 h}{4} \quad \text{Ecuación 1-3}$$

Ya con el volumen fue posible estimar la densidad de la probeta para finalmente convertir la densidad bulk en gravedad específica bulk, dividiendo por 0.99707 g/cm³ o

997.07 kg/m³, densidad del agua a 25°C (77°F).

A continuación se presentan las mediciones realizadas a cada una de las 45 probetas y su gravedad bulk, para cada contenido de asfalto y para efectos de demostración se desarrolla el cálculo de una briqueta.

EJEMPLO

Briqueta 1A

Contenido de asfalto 3.5%

M=1191.1 g

D promedio=10.13 cm

H promedio=7.26 cm

Calculando el volumen se tiene:

$$V_{cilindro} = \frac{\pi D^2 h}{4}$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi(10.13)^2(7.26)}{4}$$

$$V_{cilindro} = 585.12 \text{ cm}^3$$

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

$$\text{Densidad} = \frac{1191.1}{585.12}$$

Para la densidad

$$\text{Densidad} = 2.036 \text{ gr} / \text{cm}^3$$

Dividiendo por 0.99707 g/cm³ (Densidad del agua a 25°C) para obtener gravedad específica Bulk (Geb).

$$G_{eb} = \frac{2.036 \text{ g/cm}^3}{0.99707 \text{ g/cm}^3}$$

$$G_{eb} = 2.042$$

Y así sucesivamente se efectúa el cálculo de gravedad específica para las demás briquetas y se promedian los valores.

El cálculo debe de realizarse para cada contenido de asfalto. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada una de las briquetas analizadas y para cada uno de los contenidos de asfalto.

FAJA GRANULOMETRICA SUPERIOR "A"						
BRIQUETA	PROMEDIO		VOLUMEN (cm ³)	PESO (gr)	DENSIDAD (gr/cm ³)	GRAVEDAD ESPECIFICA DE BULK (gr/cm ³)
	ALTURA(cm)	DIAMETRO (cm)				
1A	7,26	10,13	585,12	1191,1	2,036	2,042
2A	7,32	10,11	587,63	1187,4	2,021	2,027
3A	7,28	10,19	593,70	1190,1	2,005	2,010
1B	7,22	10,18	587,66	1190,7	2,026	2,032
2B	7,24	10,20	591,60	1190,1	2,012	2,018
3B	7,30	10,22	598,85	1190,0	1,987	1,993
1C	7,07	10,15	572,06	1189,4	2,079	2,085
2C	7,07	10,18	575,45	1188,5	2,065	2,071
3C	7,01	10,23	576,18	1184,8	2,056	2,062
1D	7,02	10,14	566,90	1195,0	2,108	2,114
2D	6,81	10,13	548,85	1187,1	2,163	2,169
3D	7,04	10,21	576,22	1191,0	2,067	2,073
1E	6,98	10,19	569,24	1185,4	2,082	2,089
2E	7,04	10,14	568,51	1188,4	2,090	2,097
3E	7,00	10,18	569,75	1192,8	2,094	2,100

Tabla 1-13 Gravedad específica de Bulk "faja granulométrica A"¹³

¹³ Elaboración propia.

FAJA GRANULOMETRICA MEDIA "B"						
BRIQUETA	PROMEDIO		VOLUMEN (cm³)	PESO (gr)	DENSIDAD (gr/cm³)	GRAVEDAD ESPECIFICA DE BULK (gr/cm³)
	ALTURA(cm)	DIAMETRO (cm)				
1A	7,43	10,12	597,64	1184,1	1,981	1,987
2A	7,37	10,13	593,99	1187,5	1,999	2,005
3A	7,36	10,20	601,41	1189,5	1,978	1,984
1B	7,32	10,17	594,62	1183,6	1,990	1,996
2B	7,31	10,16	592,65	1190,0	2,008	2,014
3B	7,28	10,23	598,37	1188,2	1,986	1,992
1C	7,23	10,19	589,63	1183,5	2,007	2,013
2C	7,30	10,17	592,59	1186,8	2,003	2,009
3C	7,24	10,15	586,06	1188,0	2,027	2,033
1D	7,19	10,18	585,46	1182,6	2,020	2,026
2D	7,14	10,20	583,27	1185,2	2,032	2,038
3D	7,12	10,13	574,08	1189,8	2,073	2,079
1E	7,11	10,18	578,95	1185,0	2,047	2,053
2E	7,12	10,12	572,30	1183,8	2,068	2,075
3E	7,03	10,13	566,83	1187,5	2,095	2,101

Tabla 1-14 Gravedad específica de Bulk "faja granulométrica B"¹⁴

¹⁴ Elaboración propia.

FRANJA GRANULOMETRICA INFERIOR "C"						
BRIQUETA	PROMEDIO		VOLUMEN (cm ³)	PESO (gr)	DENSIDAD (gr/cm ³)	GRAVEDAD ESPECIFICA DEBULK (gr/cm ³)
	ALTURA(cm)	DIAMETRO (cm)				
1A	7,73	10,13	623,00	1181,0	1,896	1,901
2A	7,73	10,15	625,46	1184,0	1,893	1,899
3A	7,66	10,20	625,92	1182,0	1,888	1,894
1B	7,56	10,22	620,17	1179,5	1,902	1,907
2B	7,54	10,19	614,91	1180,0	1,919	1,925
3B	7,67	10,23	630,43	1171,0	1,857	1,863
1C	7,60	10,33	636,95	1177,5	1,849	1,854
2C	7,67	10,20	626,74	1178,5	1,880	1,886
3C	7,71	10,26	637,44	1178,4	1,849	1,854
1D	7,51	10,15	607,66	1187,7	1,955	1,960
2D	7,52	10,12	604,88	1176,0	1,944	1,950
3D	7,63	10,18	621,03	1185,5	1,909	1,915
1E	7,63	10,18	621,03	1184,0	1,907	1,912
2E	7,43	10,16	602,37	1183,0	1,964	1,970
3E	7,64	10,15	618,18	1170,0	1,893	1,898

Tabla 1-15 Gravedad específica de Bulk "faja granulométrica C"¹⁵

NOTA: La nomenclatura utilizada para distinguir las briquetas, es un número acompañado con una letra. El número indica el número de briqueeta y la letra el porcentaje de ligante usado para la mezcla (A=3.5%; B=4.0%; C=4.5%; D=5.0%; E=5.5%). Así, la briqueeta 1A se refiere a la briqueeta #1 con el 3.5% de ligante.

¹⁵ Elaboración propia.

1.5.4 Gravedad Específica Máxima Teórica

Se determinó la gravedad específica máxima teórica en base a la norma ASTM D 2041, sobre una mezcla asfáltica comparable, para evitar la influencia de diferencias en la granulometría, contenido de asfalto, etc.

$$\text{Volumen de áridos (cm}^3\text{)} = \frac{100 - \% \text{betun sobre la mezcla}}{\text{peso específico conjunto de áridos}} \quad \text{Ecuación 1-4}$$

$$\text{Volumen de betún (cm}^3\text{)} = \frac{\% \text{betun sobre la mezcla}}{\text{peso específico betún}} \quad \text{Ecuación 1-5}$$

$$\text{Densidad teórica máxima } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = 100 - (\text{Volumen áridos} + \text{volumen betún}) \quad \text{Ecuación 1-6}$$

Se presentan los resultados obtenidos para cada contenido de asfalto

DENSIDAD MAXIMA TEÓRICA			
CONTENIDO DE ASFALTO	GRANULOMETRIA "A"	GRANULOMETRIA "B"	GRANULOMETRIA "C"
3,5%	2,535	2,530	2,524
4,0%	2,515	2,510	2,505
4,5%	2,496	2,491	2,486
5,0%	2,477	2,472	2,467
5,5%	2,458	2,453	2,448

Tabla 1-16 Densidad máxima teórica faja A, B y C

1.5.5 Calculo de Vacíos

Con los resultados anteriores en los que se calculó la gravedad específica Bulk y la gravedad específica máxima teórica se determina el contenido de vacíos para cada contenido de asfalto con la siguiente ecuación:

$$\text{vacios} = \frac{G_{em} - G_{eb}}{G_{em}} * 100 \quad \text{Ecuación 1-7}$$

Dónde:

G_{em} = Gravedad específica máxima teórica

G_{eb} = Gravedad específica Bulk (Valor promedio).

EJEMPLO

Para el contenido de asfalto de 3.5% se tienen los siguientes resultados:

$G_{em}=2.54$ (valor promedio)

$G_{eb}=2.03$

Sustituyendo en la ecuación de vacíos se tiene:

$$vacios = \frac{2.54 - 2.03}{2.54} * 100$$

$$vacios = 20.20 \%$$

El cálculo se repite para los otros contenidos de asfalto; la siguiente tabla contiene los resultados obtenidos:

PORCENTAJE DE VACIOS (GRANULOMETRIA "A")			
CONTENIDO DE ASFALTO	GRAVEDAD ESPECIFICA DE BULK (gr/cm ³)	DENSIDAD MAXIMA TEORICA (gr/cm ³)	PORCENTAJE DE VACIOS (%)
3,5%	2,026	2,535	20,07
4,0%	2,014	2,515	19,91
4,5%	2,073	2,496	16,95
5,0%	2,119	2,477	14,46
5,5%	2,095	2,458	14,77

Tabla 1-17 Vacíos en la mezcla (granulometría "A")¹⁶

PORCENTAJE DE VACIOS (GRANULOMETRIA "B")			
CONTENIDO DE ASFALTO	GRAVEDAD ESPECIFICA DE BULK (gr/cm ³)	DENSIDAD MAXIMA TEORICA (gr/cm ³)	PORCENTAJE DE VACIOS (%)
3,5%	1,992	2,530	21,27
4,0%	2,001	2,510	20,30
4,5%	2,018	2,491	18,98
5,0%	2,047	2,472	17,17
5,5%	2,076	2,453	15,36

Tabla 1-18 Vacíos en la mezcla (granulometría "B")¹⁷

¹⁶ Fuente: Elaboración propia.

¹⁷ Fuente: Elaboración propia.

PORCENTAJE DE VACIOS (GRANULOMETRIA "C")			
CONTENIDO DE ASFALTO	GRAVEDAD ESPECIFICA DE BULK (gr/cm ³)	DENSIDAD MAXIMA TEORICA (gr/cm ³)	PORCENTAJE DE VACIOS (%)
3,5%	1,898	2,524	24,80
4,0%	1,898	2,505	24,22
4,5%	1,865	2,486	24,99
5,0%	1,942	2,467	21,30
5,5%	1,927	2,448	21,30

Tabla 1-19 Vacíos en la mezcla (granulometría "C")¹⁸

1.5.6 Pruebas de estabilidad y fluencia

Después de obtenido el Peso Específico Bulk de la mezcla compactada, se procede a la ejecución de los ensayos de estabilidad y fluencia, de la siguiente manera:

- a. Calibrar el cero del flujómetro, previamente montado sobre uno de los guidores, y luego de insertar la mordaza de 4" debajo del pivote.
- b. Sumergir la briqueta en baño de agua a 60 °C (140 °F), durante 30 a 40 minutos.
- c. Limpiar las guías y la superficie interior del anillo de prueba y lubricar las guías para garantizar que el segmento superior del anillo se deslice libremente sobre ellas. La temperatura de la mordaza debe mantenerse a una temperatura de 21 a 37,8 °C (70 a 100 °F), utilizando el baño de agua, si fuese necesario.
- d. Se saca la muestra del baño de agua, se coloca en la parte inferior de la mordaza, luego se inserta la parte superior de la misma. Se centra el conjunto en el dispositivo de carga y se coloca el medidor de flujo sobre el guidor superior de la mordaza.
- e. Aplicar la carga de ensayo a la muestra a una velocidad de deformación constante de 51 mm/min (2 pulg/min), hasta que ocurra la falla. El punto de falla se define como la carga máxima obtenida en el ensayo. El número total de Newtons (libras) necesario para producir la falla de la muestra se define como el valor de la estabilidad Marshall. La deformación vertical del espécimen producida por la carga, es el valor del Flujo (fluencia).

¹⁸ Fuente: Elaboracion propia.

- f. Durante el ensayo de estabilidad, sujétese firmemente el medidor de flujo en su posición sobre el guiador, y retírese en el instante mismo que la carga empieza a decrecer, se anota el valor de flujo en unidades de 0,25 mm (0,01”). Por ejemplo si la muestra se deforma 3,8 mm (0,15”), su fluencia será 15.
- g. Se promedian los valores de estabilidad y flujo para todas las muestras con cada contenido de ligante.

Las pruebas de estabilidad y fluencia, a partir de la extracción de los núcleos del baño, no deben durar un tiempo mayor a 30 segundos.

1.5.7 Desgaste en la Máquina de los Ángeles

El ensayo de desgaste conocido también como ensayo cántabro, permite valorar indirectamente la cohesión, así como la resistencia a la disgregación de la mezcla ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tránsito, ensayo desarrollado en España y retomado por diversos países como Bolivia que en su normativa ha sido adaptada “CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO CANTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE”.

Se prepararon tres probetas para cada contenido de asfalto y el ensayo se realizó procurando que la temperatura de ensayo estuviera comprendida entre 15° y 30° C, con una tolerancia máxima de $\pm 1^\circ$ C como recomendación de la norma.

Luego se determinó la masa de cada probeta con aproximación de 0.1 g.



Figura Nº 1-21 Briquetas después del desgaste en la máquina de los Ángeles

Se introdujo a continuación una probeta en el bombo de la máquina de Los Ángeles y, sin la carga abrasiva de las bolas, se hizo girar el tambor a la misma velocidad normalizada de 3.1 a 3.5 rad/s (30 a 33 rpm) del ensayo de desgaste de agregados, pero durante 100, 200 y 300 vueltas. Al final del ensayo, se sacó la probeta y se determinó de nuevo su masa con la misma aproximación de 0.1 g.



Figura N° 1-22 Maquina de los Ángeles U.A.J.M.S.

Se calculó el resultado del ensayo de pérdida por desgaste para cada probeta ensayada, mediante la expresión:

$$P = \frac{w_1 - w_2}{w_1} * 100 \quad \text{Ecuación 1-8}$$

Dónde:

P = valor de la pérdida por desgaste, en % ,

W₁ = masa inicial de la briqueta, en gramos.

W₂ = masa final de la briqueta, en gramos.

Y por último se calculó el valor medio de las tres probetas ensayadas, esto para cada contenido de asfalto.

EJEMPLO:

Contenido de asfalto 3.5%

Briqueta A

w₁=1183.6 gr

w₂= 776. gr.

$$P = \frac{W_1 - W_2}{W_1} * 100$$

$$P = \frac{1183.6 - 776}{1183.6} * 100$$

$$P = 34.41\%$$

De igual forma se repite el cálculo para las otras dos briquetas y se promedia el valor para obtener la pérdida por desgaste promedio; los resultados a continuación.

DESGATE EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES FAJA GRANULOMETRICA MEDIA "B"								
Porcentaje de ligante	Briqueta	Masa inicial de la briqueta (gr.)	Masa en (gr.) 100 rev.	Masa en (gr.) 200 rev.	Masa en (gr.) 300 rev.	Desgaste a 100 rev. (%)	Desgaste a 200 rev. (%)	Desgaste a 300 rev. (%)
3,5%	1A	1183,6	1075,65	978,87	776,28	9,12	17,30	34,41
	2A	1190,0	1056,87	967,35	799,34	11,19	18,71	32,83
	3A	1188,2	1068,98	956,78	754,26	10,03	19,48	36,52
	Promedio						10,11	18,49	34,59
4,0%	1B	1183,5	1095,65	1045,65	895,58	7,42	11,65	24,33
	2B	1186,8	1098,35	1068,58	886,36	7,45	9,96	25,32
	3B	1188,0	1088,06	1034,13	899,05	8,41	12,95	24,32
	Promedio						7,76	11,52	24,66
4,5%	1C	1182,6	1113,87	1054,45	957,65	5,81	10,84	19,02
	2C	1185,2	1123,5	1074,55	984,44	5,21	9,34	16,94
	3C	1189,8	1118,69	1102,34	990,09	5,98	7,35	16,79
	Promedio						5,66	9,17	17,58
5,0%	1D	1185,0	1129,35	1064,58	998,56	4,70	10,16	15,73
	2D	1183,8	1132,46	1059,86	1008,56	4,34	10,47	14,80
	3D	1187,5	1142,56	1115,12	988,68	3,78	6,10	16,74
	Promedio						4,27	8,91	15,76
5,5%	1E	1185,0	1161,23	1115,08	1038,25	2,01	5,90	12,38
	2E	1183,8	1087,52	1025,89	989,23	8,13	13,34	16,44
	3E	1187,5	1142	1097,67	996,78	3,83	7,56	16,06
	Promedio						4,66	8,93	14,96

Tabla 1-20 Resultado de desgaste de briquetas máquina de los Ángeles.¹⁹

Ver en anexos para la granulometría "A" y "C".

¹⁹ Fuente: Elaboración propia.

DESGASTE EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES A 300 rev. (%)			
PORCENTAJE DE LIGANTE	FRANJA GRANULOMETRICA SUPERIOR "A"	FRANJA GRANULOMETRICA MEDIA "B"	FRANJA GRANULOMETRICA INFERIOR "C"
3,50%	43,78	34,57	41,44
4,00%	38,47	24,73	27,38
4,50%	27,15	17,60	21,08
5,00%	20,97	15,79	20,94
5,50%	17,07	14,96	20,72

Tabla 1-21 Resumen de resultados desgaste de los Ángeles²⁰

1.5.8 Permeabilidad

Los estudios españoles desarrollaron el permeámetro L.C.S. para la evaluación de este parámetro, sin embargo en la normativa colombiana INVIAS, se contempla la evaluación de la permeabilidad como un ensayo complementario, lo utilizan para la verificación, de que los vacíos de aire contenido en la mezcla, realmente se encuentren interconectados.

En las INVIAS no existe una norma para esta prueba, solo establece que se debe verter 100 ml de agua sobre la probeta pre-humedecida y medir el tiempo que esta tarda en atravesar la probeta, sin que este tiempo sea mayor de 15 s, sin embargo para establecer condiciones semejantes entre cada prueba, en esta prueba las briquetas se mantuvieron sumergidas por un tiempo de 4 minutos.

CONTENIDO DE ASFALTO	TEMPERATURA DEL AGUA °C	PERMEABILIDAD ml/s
3,50%	25,0	5,10
4,00%	25,0	6,20
4,50%	25,5	7,81
5,00%	26,0	10,27
5,50%	25,5	16,24

Tabla 1-22 Resultados de ensayo de permeabilidad²¹

La prueba se hizo sobre las briquetas contenidas en los moldes Marshall donde fueron compactadas, las cuales antes de la realización fueron sumergidas en agua por un periodo de 4

²⁰ Fuente: Elaboración propia

²¹ Fuente: Elaboración propia

min, y dejadas reposar hasta dejar de observar en la cara inferior escurrimiento del agua retenida en la briqueta, luego se vertieron 100 ml de agua sobre la misma y se tomó el tiempo en que tardó en atravesar el agua, la briqueta.

1.6 Cálculo de Vacíos Empleando Tomografía Computarizada

La identificación de los vacíos al interior de la mezcla se basa en la escala de grises de las secciones obtenidas mediante tomografía (Figura 3-23).



Figura Nº 1-23 Tomógrafo Hospital San Juan de Dios

El color de cada partícula en la imagen está directamente relacionado con la densidad del material que representa, siendo los objetos más oscuros los de menor densidad (vacíos) y los más claros los de mayor densidad (agregados). De esta manera, a la graduación de grises se le asigna una escala numérica, que por lo general va desde cero (representando el color negro) hasta 255 (representando el color blanco). Para obtener el área de los vacíos se utilizaron algoritmos computacionales de procesamiento de imágenes que, con base en un valor límite dentro de la escala numérica de grises, transforman la imagen (sección) en una composición binaria (blanco y negro) con el fin de diferenciar el material sólido de los vacíos, tal como se muestra en la Figura 3-24.

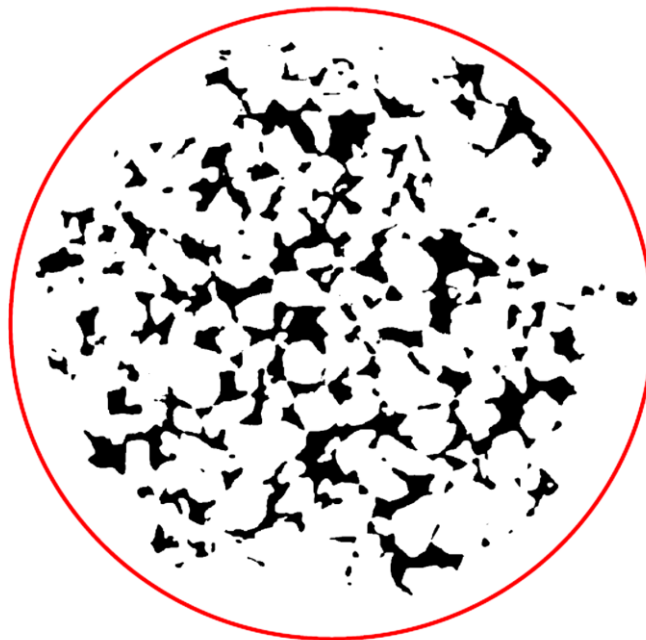
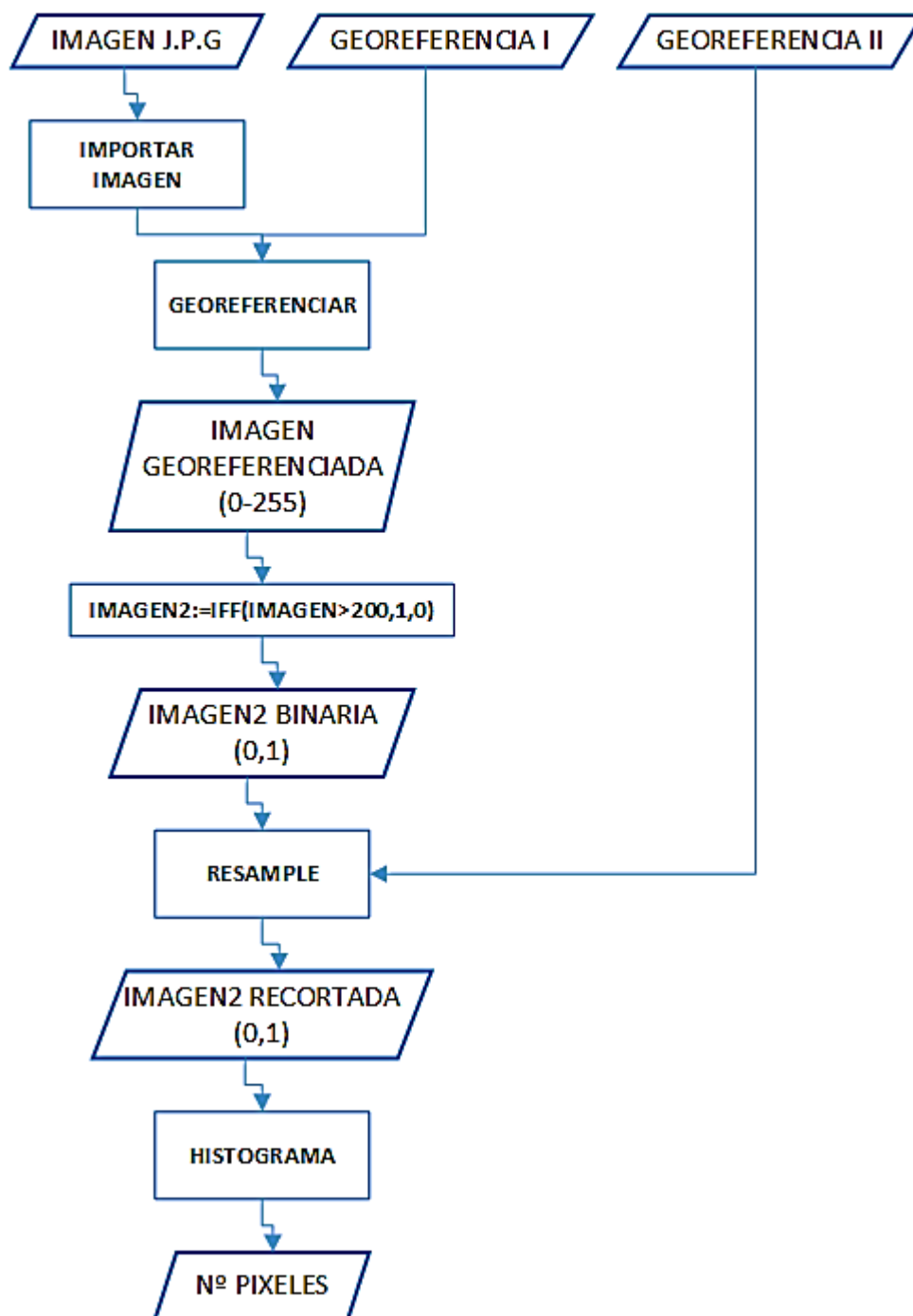


Figura Nº 1-24 Imagen en composición binaria

Una vez obtenida la imagen en una composición binaria con la ayuda del histograma se determina la cantidad de pixeles correspondiente a cada valor, de acuerdo a la dimensión de la imagen obtenida mediante tomografía 18.06 x 18.06 cm y resolución de 512 x 512 pixeles, se determinó que el área correspondiente a cada pixel es de 0.124 mm^2 , por lo que una vez que se obtuvo la cantidad de pixeles que corresponde a los agregados se multiplicó por el área de cada pixel obteniendo de esta manera el área total de los agregados, posteriormente conociendo la área total de la briqueta de estudio con una simple diferencia se obtiene el área de los vacíos de cada imagen.

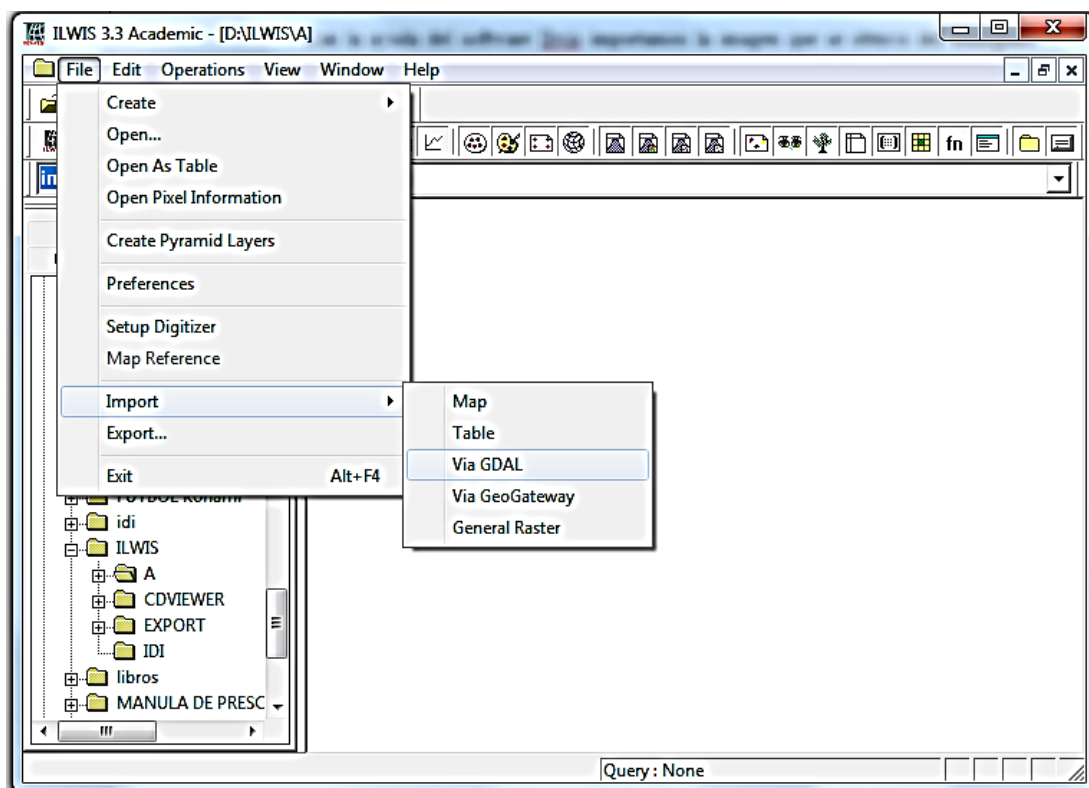
Para una mejor comprensión se presenta a continuación un flujograma donde nos muestra el proceso que se realiza para poder obtener una imagen binaria con la ayuda del software Ilwis y su posterior obtención del número de pixeles.



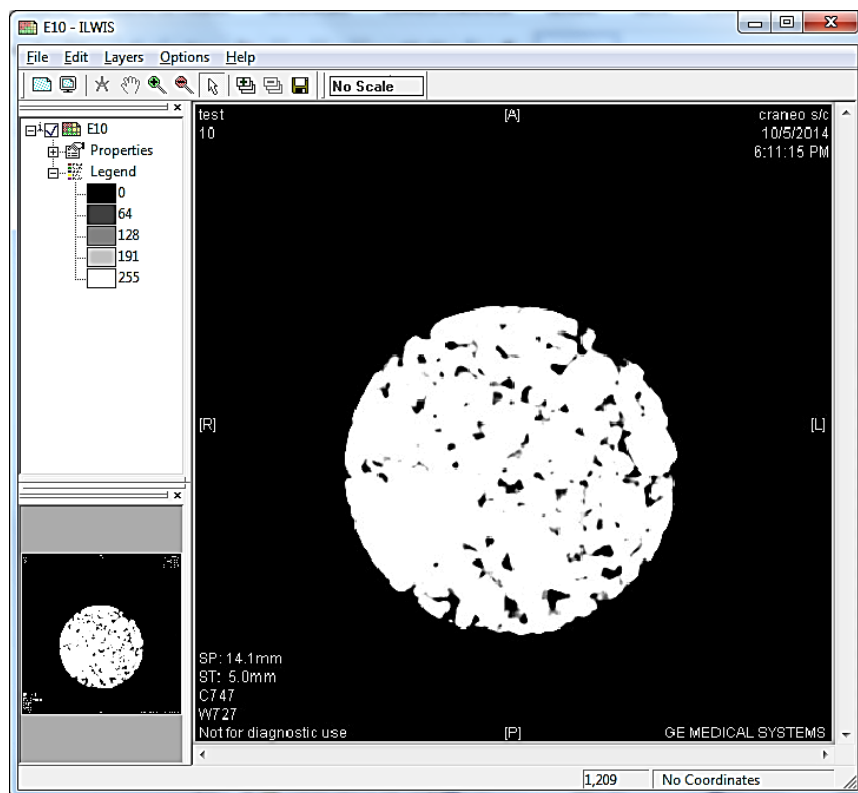
La georeferencia I y II son los límites de la imagen con las que vamos a trabajar, es decir, la georeferencia I nos indica los límites reales de la resolución que se tiene, la cual es de 512 x 512 píxeles, la georeferencia II es el límite más pequeño al original, utilizamos esta georeferencia con la finalidad de poder recortar la imagen para evitar tener un número de píxeles erróneo. Con

las georeferencias definidas y la imagen obtenida del tomógrafo en formato j.p.g, podemos iniciar el procesamiento de dicha imagen.

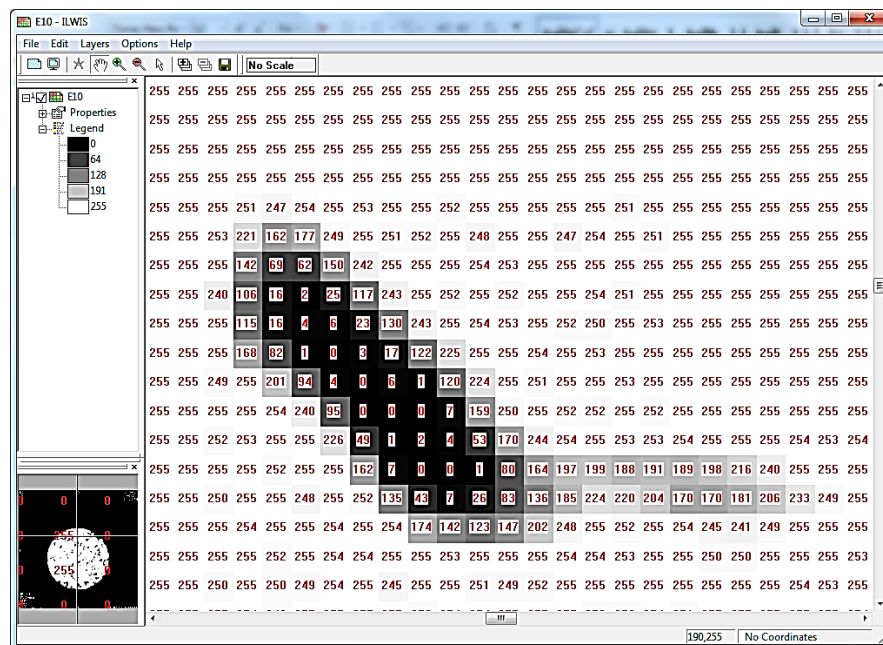
Con la ayuda del software Ilwis importamos la imagen que se obtuvo del tomógrafo como se muestra en la siguiente figura.



Una vez que se importa la imagen podemos observar la imagen importada nos presenta una degradación de color grises donde el valor de los pixeles varía de 0 a 255, en la siguiente figura se observa en el margen izquierdo donde nos muestra la degradación de los colores.



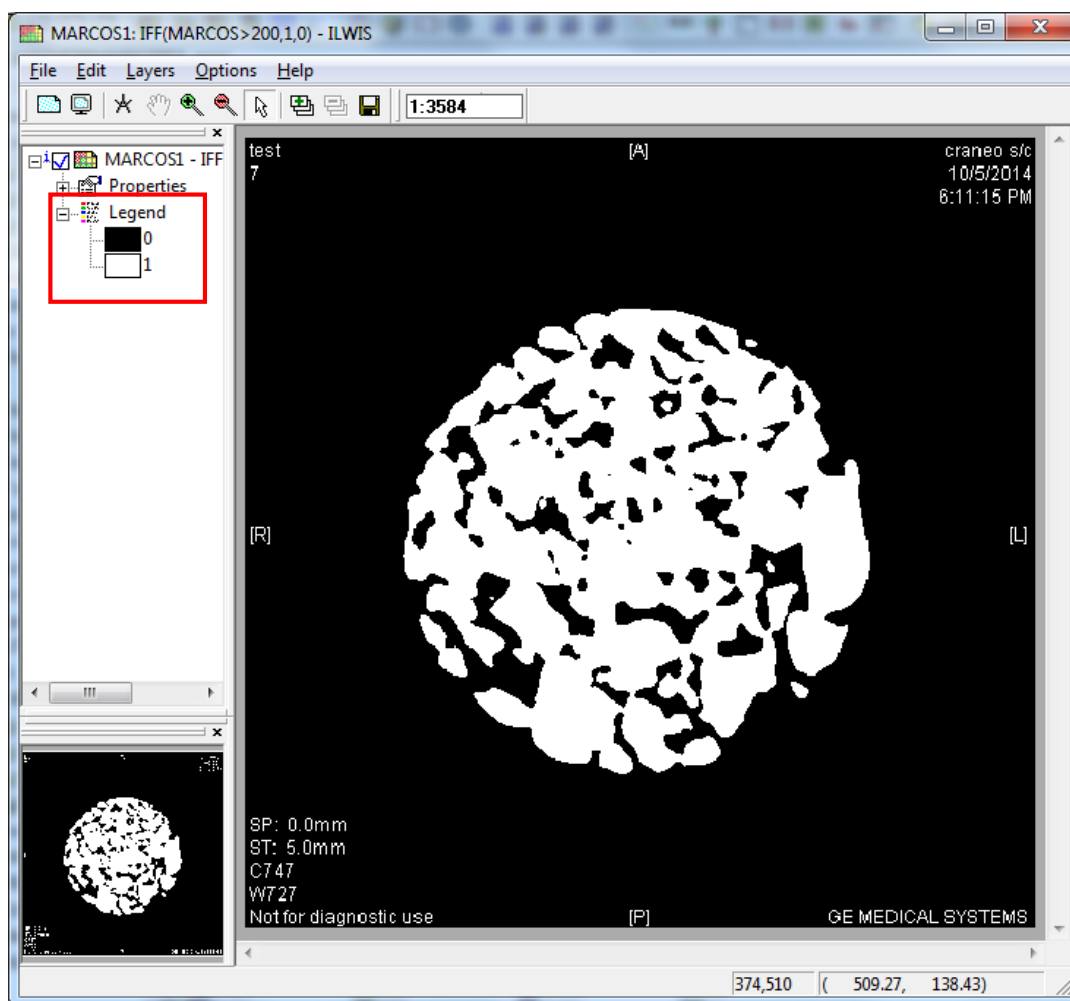
Para poder convertir a una imagen binaria se analizó el límite entre el valor cero y el 255 ya que la degradación de críes cada pixel va adquiriendo diferente valor, como se muestra en la siguiente figura, analizando y realizando diferentes pruebas se determinó que el límite con el cual se trabajará es de 200.



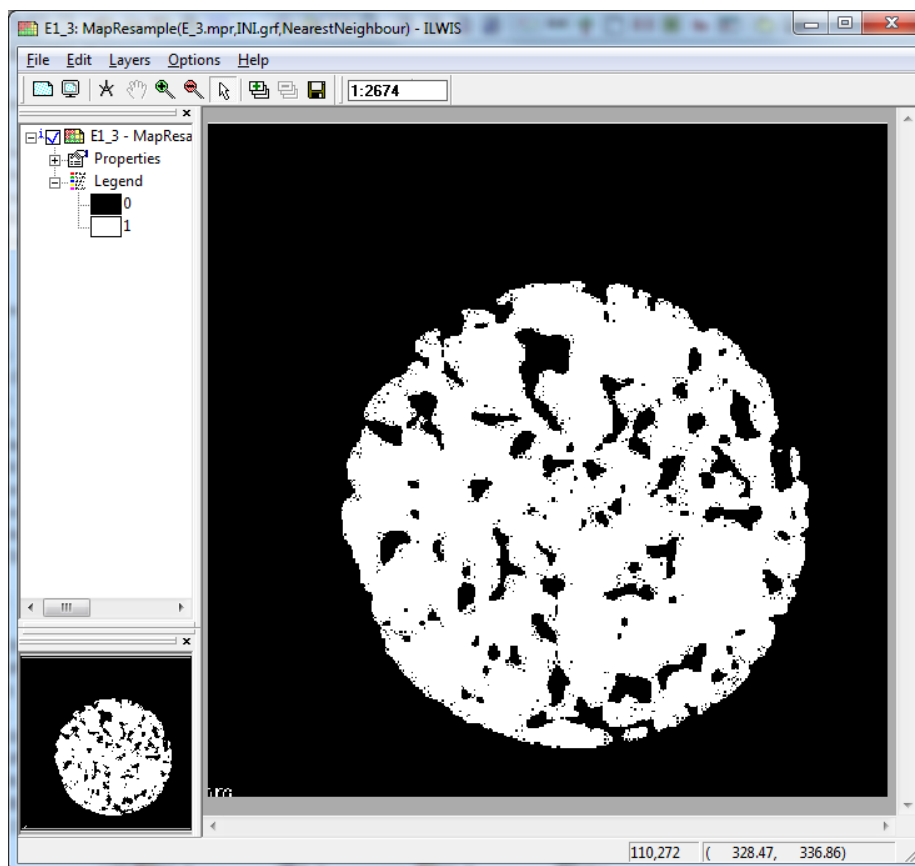
Una vez definido el límite utilizamos la siguiente función en la línea de comando del software:

$$\text{IMAGEN2}:=\text{IFF}(\text{IMAGEN1}>200,1,0)$$

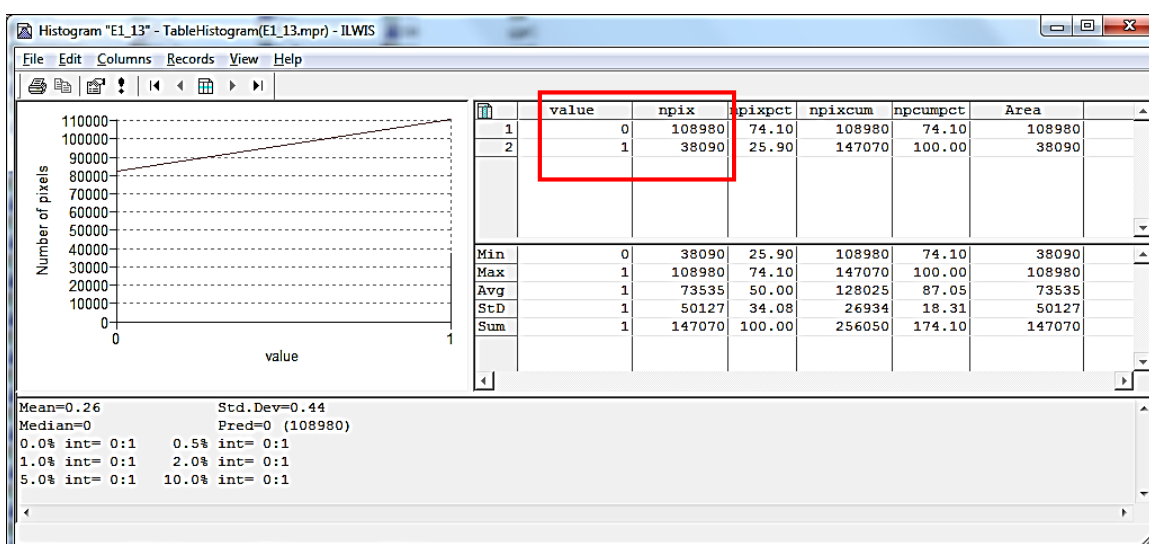
Lo que nos indica que si la IMAGEN2 tiene pixeles con valores mayores a 200 estos serán convertidos a un valor de 1, y los demás pixeles serán cambiados por 0, obteniendo como resultado la siguiente figura.



Como se observa en la figura anterior tenemos texto que son propios de la imagen que nos proporciona la tomografía, motivo por el cual se debe recortar la imagen para que estos pixeles no afecten el resultado esperado.



Con la ayuda de la función resample y la georeferencia II se puede recortar la imagen para poder tener un valor más real de la cantidad de píxeles, una vez obtenida esta imagen se procede a obtener el histograma donde nos indica la cantidad de píxeles para los valores de cero y uno, como se muestra en la siguiente figura. Los píxeles con los que trabajamos será los del valor 1, que representan a los agredados.



Una vez obtenido el número de pixeles que representan a los agregados y conociendo el área de cada pixel determinamos el área ocupado por agregados, también conociendo el área de la briqueta estudiada y con una simple diferencia entre el área de la briqueta y el área ocupada por los áridos podemos determinar el área de vacíos, conociendo ya el área de vacíos podemos determinar el porcentaje de vacíos como se explica a continuación.

El porcentaje de vacíos en cada imagen binaria, P_i , y el total para un espécimen (contenido total de vacíos), P_{Total} , se calculan como:

$$P_i = \frac{A_{vi}}{A_{Ti}} \quad \text{Ecuación 1-9}$$

$$P_t = \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{N} * 100 \quad \text{Ecuación 1-10}$$

Donde:

P_i : Porcentaje de vacíos en cada imagen

P_t : Porcentaje de vacíos en la briqueta (mm^2)

A_{vi} : Área de vacíos en cada imagen (mm^2)

A_{Ti} : Área de la sección transversal del espécimen (mm^2)

N : Número de imágenes

EJEMPLO:

Contenido de asfalto 4.5. %

Briqueta A

Área de briqueta: 8155.29 mm^2

Área de pixel: 0.124 mm^2

$$\text{Área de agregado} = \text{Área de pixel} * N^{\circ} \text{ de pixeles} \quad \text{Ecuación 1-11}$$

$$\text{Área de vacios} = \text{Área de briqueta} - \text{Área de agregado} \quad \text{Ecuación 1-12}$$

N° DE CORTE TRANSVERSAL	N° DE PÍXELES	AREA DEL AGREGADO (mm ²)	AREA DE VACIOS (mm ²)	VACIOS EN CADA IMAGEN
1	54032	6699,968	1455,3	0,1784
2	52057	6455,068	1700,2	0,2085
3	51047	6329,828	1825,44	0,2238
4	50239	6229,636	1925,632	0,2361
5	48502	6014,248	2141,02	0,2625
6	49157	6095,468	2059,8	0,2526
7	50026	6203,224	1952,044	0,2394
8	48709	6039,916	2115,352	0,2594
9	52610	6523,64	1631,628	0,2001
10	51928	6439,072	1716,196	0,2104
11	52433	6501,692	1653,576	0,2028
12	53204	6597,296	1557,972	0,1910
13	52324	6488,176	1667,092	0,2044
14	48528	6017,472	2137,796	0,2621
			% VACIOS BRIQUETA	22,3686

Tabla 1-23 Porcentaje de vacíos en mezcla drenante obtenidos mediante imágenes binarias²²

También se realizó el cálculo de vacíos mediante las imágenes obtenidas por tomografía para una mezcla semi-cerrada o semi-densa la cual la proporción de vacíos en la mezcla no superara el 5%. El procedimiento es el mismo que el de mezclas drenantes y los resultados se presentan en la siguiente tabla

²² Fuente: Elaboración propia

Datos		
Area de pixel	0,124	mm ²
Area de briqueta	8155,268	mm ²
Nro de Briqueta	1	
Porcentaje de ligante	6%	

N° DE CORTE TRANSVERSAL	N° DE PÍXELES	AREA DEL AGREGADO (mm²)	AREA DE VACIOS (mm²)	VACIOS EN CADA IMAGEN
1,00	61658,00	7645,59	509,68	0,062
2,00	62882,00	7797,37	357,90	0,044
3,00	63404,00	7862,10	293,17	0,036
4,00	63176,00	7833,82	321,44	0,039
5,00	62932,00	7803,57	351,70	0,043
6,00	62776,00	7784,22	371,04	0,045
7,00	62702,00	7775,05	380,22	0,047
8,00	62410,00	7738,84	416,43	0,051
9,00	62882,00	7797,37	357,90	0,044
10,00	62506,00	7750,74	404,52	0,050
11,00	61890,00	7674,36	480,91	0,059
			% VACIOS BRIQUETA	3,72

Tabla 1-24 Porcentaje de vacíos en mezcla semi-cerrada obtenidos mediante imágenes binarias²³

El porcentaje de vacíos para las diferentes granulometrías y porcentajes de asfalto se presentan en la tabla de resumen, que se encuentra a continuación.

²³ Fuente: Elaboración propia.

PORCENTAJE DE VACIOS OBTENIDOS CON IMÁGENES BINARIAS					
PORCENTAJE DE ASFALTO	Nº DE BRIQUETA	MEZCLA DRENANTE GRANULOMETRIA "A" (%)	MEZCLA DRENANTE GRANULOMETRIA "B" (%)	MEZCLA DRENANTE GRANULOMETRIA "C" (%)	MEZCLA SEMI-CERRADA (%)
4%	1	21,35	23,75	26,47	-----
4,50%	2	18,65	22,37	27,01	5,21
5%	3	17,24	19,85	23,89	4,15
6%		-----	-----	-----	3,72

Tabla 1-25 Resumen de porcentaje de vacíos obtenido mediante imágenes binarias²⁴

1.6.1 Cuantificación del Contacto Agregado-Agregado

La cuantificación del contacto agregado-agregado en la mezcla drenante se realizó a partir de imágenes digitales adquiridas mediante TC-RX. Este análisis permitió la cuantificación del número de partículas y el número de puntos de contacto en una determinada imagen digital como indicador de las condiciones de contacto agregado-agregado alcanzadas por la mezcla. Cada imagen digital empleada corresponde a una representación bidimensional de la sección transversal, en escala de grises, de especímenes cilíndricos compactados (i.e., 70 ± 5 mm de altura y 100 mm de diámetro).

La cuantificación del contacto agregado-agregado se la realizó de manera visual primero se determinó el número de partículas para cada corte transversal de las briquetas de granulometría A, granulometría B y granulometría C. como se puede observar a continuación en la tabla 3-24.

²⁴ Fuente: elaboración propia.

N° DE PARTICULAS				
N° DE CORTE TRNSVERSAL	ALTURA (mm)	MD. GRANULOMETRIA A	MD. GRANULOMETRIA B	MD. GRANULOMETRIA C
1	0	101	81	90
2	5	114	87	94
3	10	112	82	87
4	15	118	93	95
5	20	121	110	110
6	25	115	123	103
7	30	127	118	108
8	35	124	110	105
9	40	117	98	90
10	45	132	116	112
11	50	125	103	95
12	65	119	85	101
13	70	124	76	87
14	73	105	74	85

Tabla 1-26 Distribución vertical del número de partículas²⁵

Seguidamente se realizó la cuantificación del número de contactos en cada imagen de los diferentes niveles de corte en las briquetas. A continuación se presenta la tabla de resultados del número de contactos para las tres granulometrías de diseño.

²⁵ Fuente: Elaboracion propia.

N° DE CONTACTOS				
N° DE CORTE TRANSVERSAL	ALTURA (mm)	MD. GRANULOMETRIA A	MD. GRANULOMETRIA B	MD. GRANULOMETRIA C
1	0	125	93	98
2	5	138	99	102
3	10	124	105	98
4	15	148	101	113
5	20	135	133	117
6	25	170	149	124
7	30	158	167	134
8	35	187	158	127
9	40	176	135	123
10	45	158	138	119
11	50	160	124	98
12	65	148	134	101
13	70	134	125	90
14	73	128	110	89

Tabla 1-27 Distribución vertical del número de contactos.²⁶

²⁶ Fuente: Elaboración propia

1.7 Resumen y Análisis de Resultados

Con la finalidad de evaluar los resultados obtenidos en los ensayos para determinar las propiedades físico - mecánicas de las mezclas asfálticas drenantes se realiza un análisis comparativo de resultados el mismo que es importante para determinar las características de la mezcla drenante con respecto a la mezcla convencional.

Para el efecto de análisis se realizaron tablas y gráficos que muestran la diferencia de resultados entre las cuatro mezclas. Se estableció que la mezcla convencional como drenante superan los requerimientos mínimos especificados por las normas que rigen a cada ensayo.

Con la finalidad de disponer de la información suficiente para que el análisis de resultados sea confiable se fabricaron 75 briquetas Marshall con mezcla drenante y 25 briquetas Marshall con mezcla convencional, las mismas que fueron utilizadas en cada uno de los ensayos como se describe en el capítulo 3.

En la siguiente tabla se resume de manera puntual, los valores necesarios para la obtención del contenido óptimo de asfalto.

CONTENIDO DE ASFALTO	% VACIOS	% DE DESGASTE (CANTABRO)	PERMEABILIDAD
3,5%	21,27	34,59	5,10
4,0%	20,30	24,66	6,20
4,5%	18,98	17,58	7,81
5,0%	17,17	15,76	10,27
5,5%	15,36	14,96	16,24

Tabla 1-28 Tabla de resumen % de vacíos, % de desgaste y permeabilidad.²⁷

Al observar los resultados obtenidos, efectivamente se observa el comportamiento que se esperaba para los diferentes parámetros de diseño.

²⁷ Fuente: Elaboracion propia

Determinación del Contenido Optimo de Asfalto

Los criterios de diseño vistos en la sección 3.3 de este capítulo, se resumen en la siguiente tabla:

PERMEABILIDAD	100ml en 15s
PERDIDA POR DESGASTE	<25%
CONTENIDO DE ASFALTO	3%-7%

Tabla 1-29 criterio de diseño de mezclas asfálticas²⁸

El método de diseño para mezclas drenantes es sencillo, consiste en seleccionar el contenido de asfalto para el cual se cumple con las exigencias establecidas y ese será el contenido óptimo. Para el porcentaje de vacíos se tiene tres normas de diferentes países, en esta investigación nos basaremos en las normas de España y Chile, debido que estas normas tienen mayor aplicabilidad en proyectos de características similares a esta investigación.

PAIS	PORCENTAJE DE VACIOS (%)	
	Mayor del	Menor del
España	16	25
Chile	18	25
Colombia	20	25

Tabla 1-30 Porcentaje de vacíos ²⁹

²⁸ Fuente: Elaboración propia.

²⁹ Fuente: Normas de España, Chile y Colombia.

Primer análisis

Con la tabla resumen se pueden elaborar los gráficos de los distintos criterios (vacíos, desgaste en seco, permeabilidad) contra el contenido de asfalto.

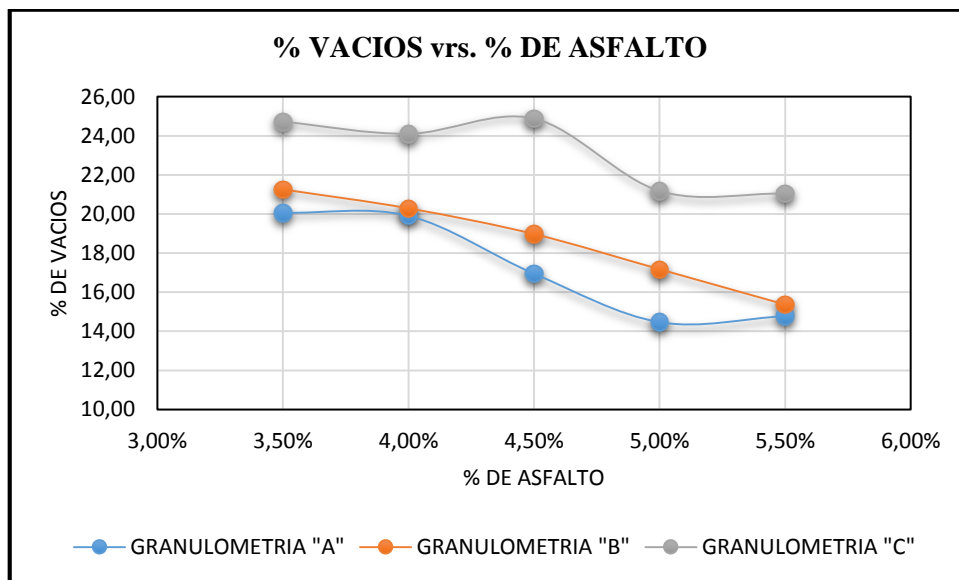


Gráfico 2 Porcentaje de vacíos para las granulometrías A, B y C³⁰

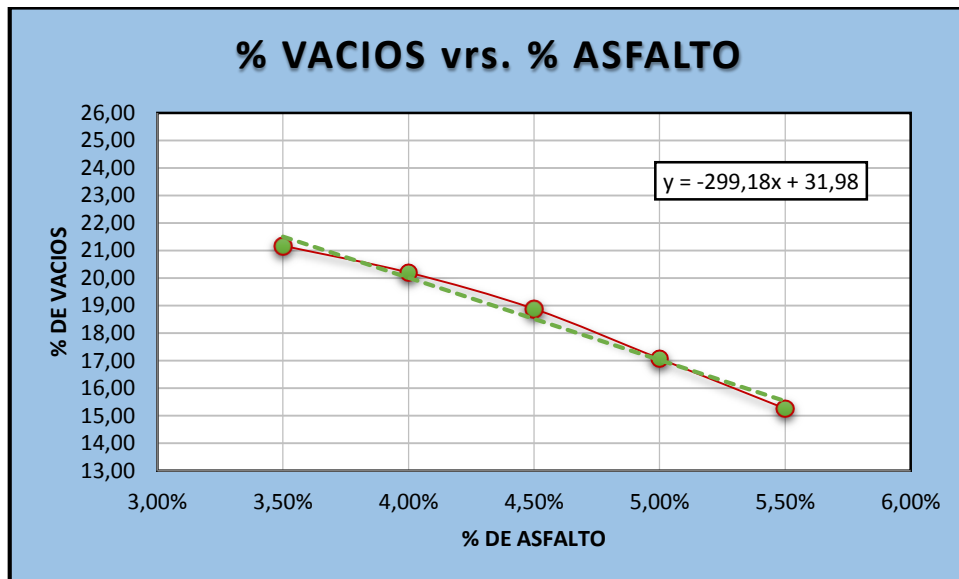


Gráfico 3 % de Vacíos vs. % de Asfalto granulometría "B"

³⁰ Fuente: Elaboración propia.

Utilizando la ecuación de la línea de tendencia $y = -299.18x + 31.98$ la cual se obtuvo con la hoja de cálculo es posible reordenarla de la siguiente manera:

$$x = (y - 31.98) / (-299.18)$$

Donde:

X= representa el contenido de asfalto

Y= representa los vacíos en la mezcla

Si sustituimos en la ecuación por los valores límites de vacíos que perseguimos en el diseño, o sea $y_1 = 16\%$ y $y_2 = 25\%$ se obtiene el rango entre el que debemos fijar nuestro contenido de asfalto para obtener los vacíos requeridos.

Para $y_1 = 16\%$ se tiene $x_1 = 5.34\%$

Para $y_2 = 25\%$ se tiene $x_2 = 2.33\%$

Se observa que para obtener el 25% de vacíos en nuestro diseño, el contenido de asfalto debe de ser muy pequeño, de hecho si utilizáramos el valor promedio entre ellos (3.84%) como nuestro contenido óptimo de asfalto, con el fin de obtener el 20% de vacíos (promedio de los límites 16% y 25%) se obtendría lo siguiente:

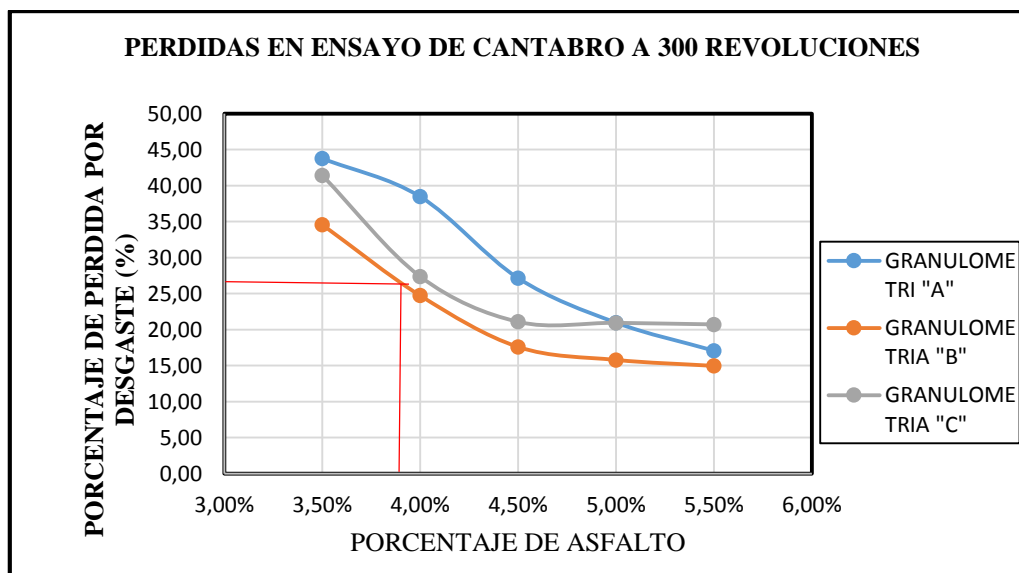


Gráfico 4 Desgaste Cántabro vs. % de Asfalto³¹

³¹ Fuente: Elaboración propia.

Al interceptar en el gráfico del ensayo de cántabro el 3.84% de contenido de asfalto necesario para alcanzar el 20% de vacíos se puede observar que el desgaste está muy por arriba del permitido por la norma que es del 25%.

Es evidente que el contenido de asfalto requerido para cumplir con el desgaste debe de ser mucho mayor al ideal obtenido en el caso planteado, de hecho no hay que olvidar que dentro de los criterios establecidos por la normativa base de esta investigación; se encuentra que el contenido de asfalto no debe de ser menor o igual al 4.5%, ya que de acuerdo a esta normativa, es con este contenido de asfalto con el que se puede garantizar una adecuada envoltura de agregados y una película de grosor que proteja las partículas de la mezcla, punto clave para la durabilidad, de hecho, en el desarrollo de las pruebas de laboratorio, se observó que para contenidos de 3.5%, el asfalto no parecía ser suficiente como para garantizar la envoltura de los agregados.

Segundo análisis

Se podría establecer cuál es el contenido de asfalto necesario para cumplir con el 25% de desgaste en el ensayo de cantabro y luego corroborar los vacíos con el contenido seleccionado a partir de ese análisis. Este análisis solo se realizara con la granulometría “B” por qué las otras dos granulometrías presentan un desgaste mayor al indicado en la norma.

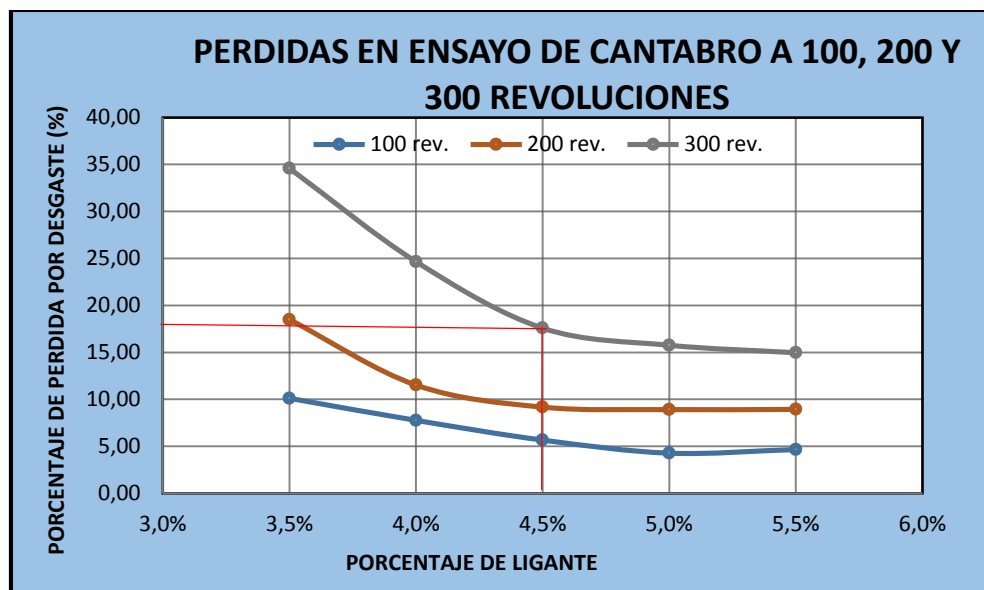


Gráfico 5 Perdida por ensayo de Cántabro granulometría “B”³²

Aproximadamente el contenido de vacíos para obtener un 25% de desgaste es de 4% sin embargo es preferible que el contenido sea más alto ya que este está por debajo del límite, en tal caso se tiene que el valor recomendado por la norma que es el 4.5% y se obtiene un desgaste del 17.58%.

Vacíos

³² Fuente: Elaboracion propia.

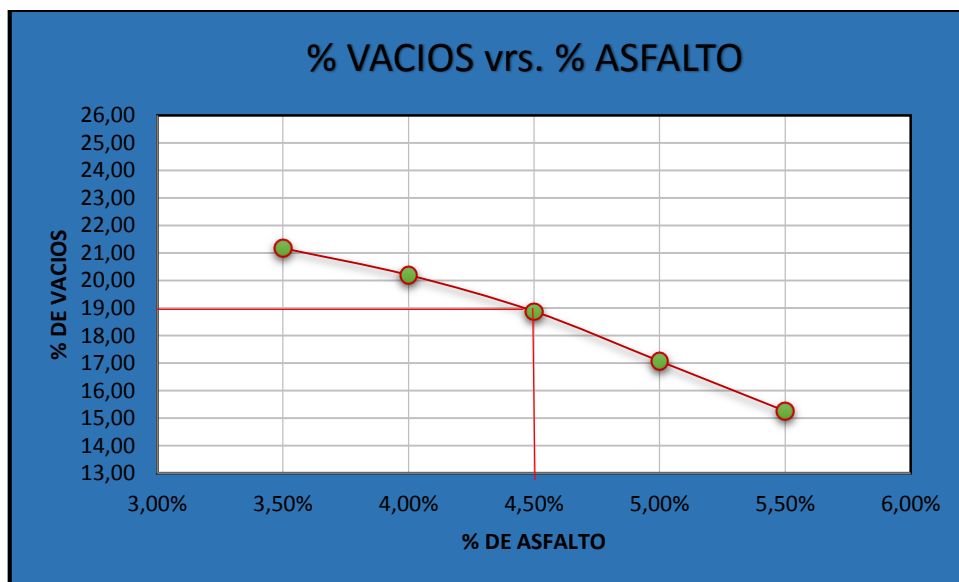


Gráfico 6% de Vacíos vs. % de Asfalto granulometría "B"³³

Conociendo el porcentaje de contenido de asfalto y con la ayuda de la grafico 6. Se obtiene un porcentaje de vacíos del 18.98%.

Permeabilidad

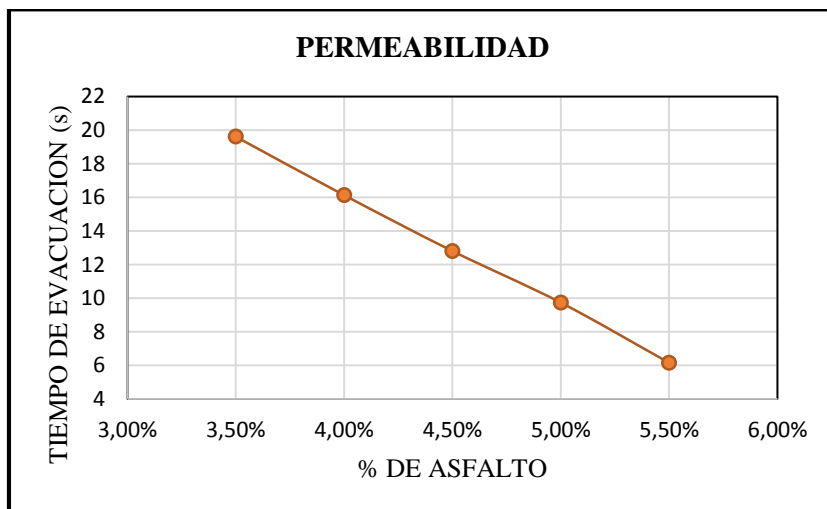


Gráfico 7 Permeabilidad³⁴

De la gráfica 7 de permeabilidad para un contenido de 4.5% de asfalto se obtiene un tiempo de evacuación de 12.8 s.

³³ Fuente: Elaboracion propia

³⁴ Fuente: Elaboración propia

CRITERIOS DEL METODO CANTABRO	RESULTADOS	ESPECIFICACION	COMPARACION
Vacios	19,6%	20% <vacios<25%	Ok
Permeabilidad	12,8 s	100 ml en 15s	Ok
Perdida por desgaste	18%	<25%	Ok
Contenido de asfalto	4,5%	≥4,5%	Ok

Tabla 1-31 Comparación de resultados³⁵

En la tabla 3-31 se observa que los resultados satisfacen los parámetros establecidos por la norma, por lo que se considera como satisfactorio el diseño con un contenido de 4.5% de asfalto.

En la tabla 3-32 se presenta los resultados obtenidos de vacíos mediante tomografía computarizada en rayos-x.

VACIOS DETERMINADOS CON TOMOGRAFIA COMPUTARIZADA	ESPECIFICACION	RESULTADOS
Vacios	20% <vacios<25%	22,4%
Contenido de asfalto	≥4,5%	4,5%

36

Tabla 1-32 Vacíos mediante tomografía computarizada granulometría "B"

Considerando las tablas anteriores podemos decir: para que la mezcla cumpla con los parámetros establecidos por la norma se debe trabajar con un porcentaje de asfalto igual al 4.5% ya que con este valor la mezcla a utilizar es la adecuada.

El diseño por el método cántabro ya ha sido concluido evaluando los criterios vistos anteriormente, sin embargo considerando que en el país se utiliza el método de diseño Marshall en el cual la evaluación de la estabilidad de la mezcla representa el parámetro más importante para la selección del contenido óptimo de asfalto, se consideró conveniente realizar esta prueba a la mezcla con el propósito de establecer comparaciones.

El ensayo de estabilidad Marshall evalúa la carga bajo la cual el espécimen falla. El ensayo se realizó a la mezcla con la granulometría de diseño seleccionada, con el contenido óptimo de asfalto obtenido por el método de diseño cántabro del 4.5%; la norma AASHTO T 245 describe el procedimiento de cálculo empleado.

³⁵ Fuente. Elaboracion propia

³⁶ Fuente. Elaboracion propia

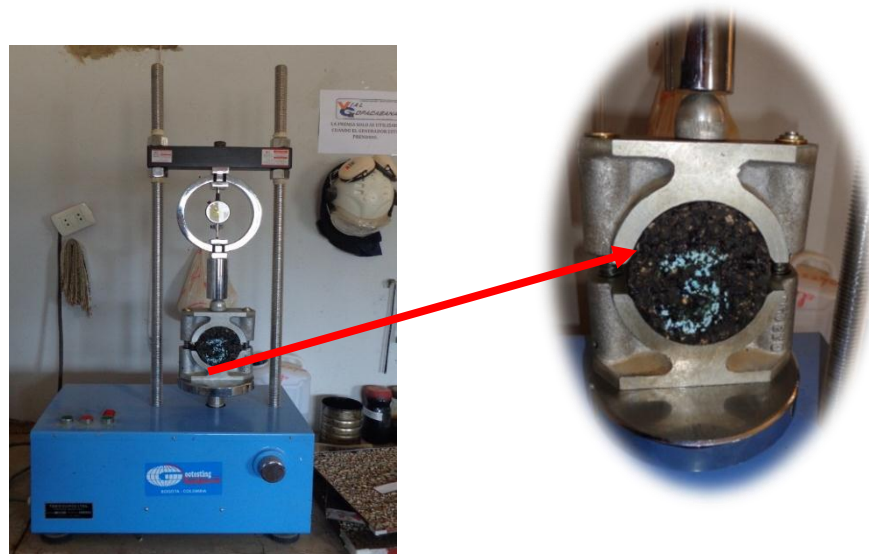


Tabla 1-33 Fotografía tomada laboratorio de control de calidad consorcio vial Copacabana

Especificación del Método Marshall	Tráfico Liviano		Tráfico Mediano		Tráfico Pesado	
	Min.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
No. de golpes	35		50		75	
Estabilidad						
Newtons	3336		5338		8006	
Libras	750		1200		1800	
Fluencia 0,25 mm (0,01")	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5

Tabla 1-34 Especificaciones Marshall de diseño³⁷

Los resultados obtenidos del ensayo Marshall para el porcentaje de asfalto 4.5% se muestran en el siguiente cuadro, los resultados obtenidos del ensayo Marshall para los diferentes contenidos de asfaltos y granulometrías se presenta en anexo 3.

³⁷ Fuente: The Asphalt Institute's, Manual (MS-2).

N° Probeta	% Asfalto		volumen	Densidad Probeta						% de Vacíos		Flujo	
	Base mezcla	Base Agregado	Probeta	Densidad Real	Densidad Promedio	Densidad Máxima Teórica	% de Vacíos Mezcla Total	V.A.M. (Vacíos Agregados Mineral)	R.B.V. (Relación Betumen Vacíos)	LEC. DIAL	Carga	Carga Promedio	promedio
	[%]	[%]	[cc]	[grs./cm ³]	[grs./cm ³]	[grs./cm ³]	[%]	[%]	[%]		[Libras]	[Libras]	1/100 plg
1	4,5	4,7	595,5	1,987						30	2036,53		
2	4,5	4,7	597,9	1,985						29	1968,03		
3	4,5	4,7	592,3	2,006	1,993	2,491	19,99	28,83	30,82	28	1899,53	1968	16,00

Tabla 1-35 Resultados de estabilidad granulometría "B"

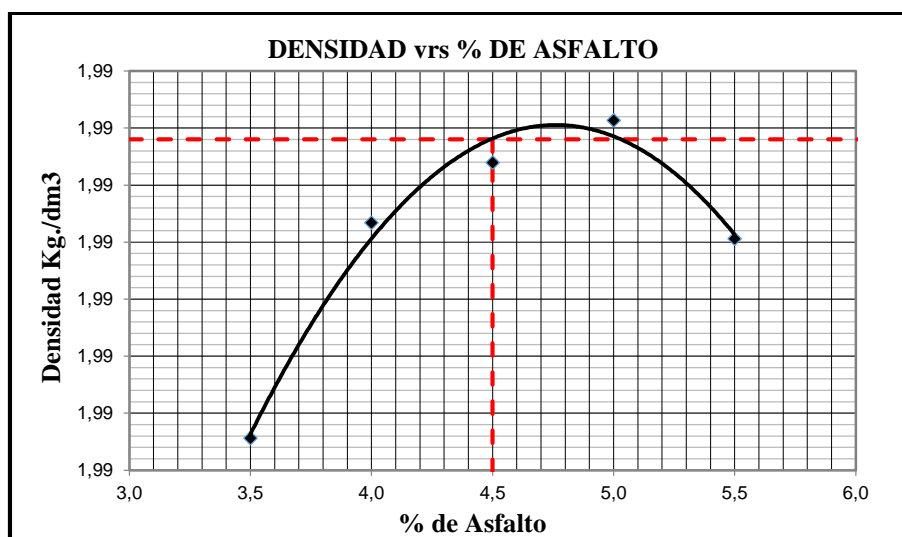


Gráfico 8 Densidad vs. % de asfalto

En la curva de densidad de la mezcla se observa que esta aumenta hasta un cierto porcentaje de asfalto, luego tiende a disminuir.

Así para esta curva, el porcentaje óptimo será aquel que de la máxima densidad (4.8% de asfalto)

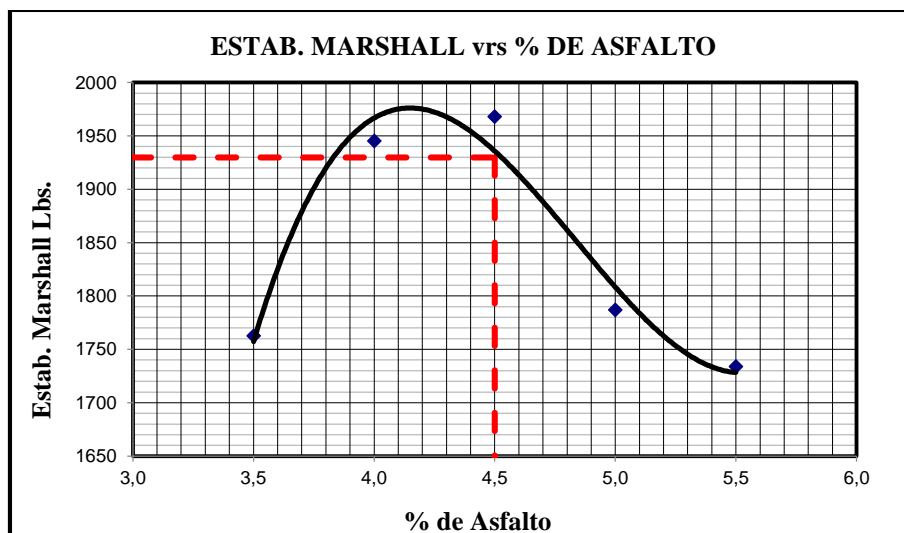


Gráfico 9 Estab. Marshall vs. %de asfalto³⁸

Los valores de estabilidad Marshall aumentan hasta un determinado valor de contenido de asfalto y luego disminuyen cuando el porcentaje de asfalto es mayor.

Mientras que en la curva, el porcentaje óptimo de asfalto es aquel que da una estabilidad máxima (4.15% de asfalto).

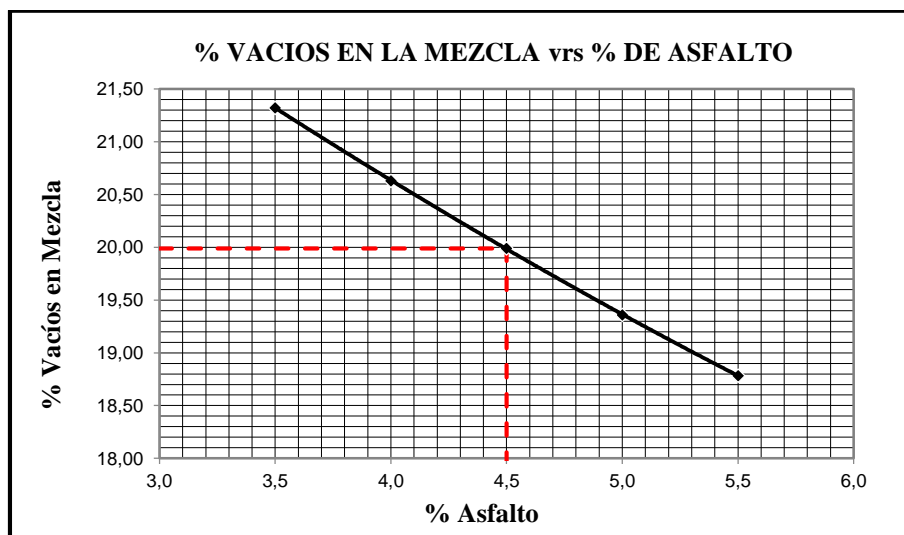


Gráfico 10 % de vacíos vs. %de asfalto³⁹

El porcentaje de vacíos de aire disminuye a medida que aumenta el porcentaje de asfalto.

³⁸ Fuente: Elaboracion propia.

³⁹ Fuente: Elaboracion propia.

Para esta curva, el porcentaje óptimo será aquel que dé un % de vacíos que este 16% y 25% (4.5 % de asfalto) por tratarse de mezclas drenantes.

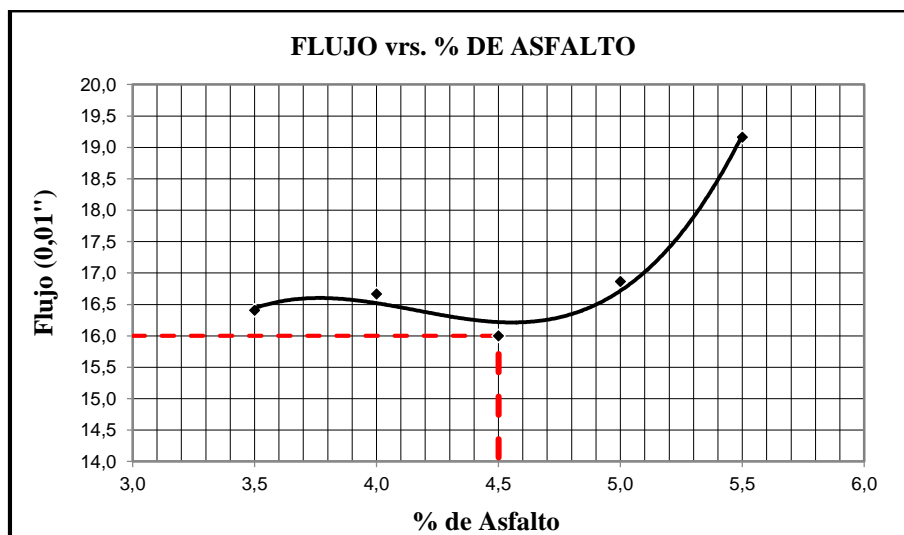


Gráfico 11 Flujo vs. %de asfalto⁴⁰

Los valores de fluencia aumentan con incrementos de contenido de asfalto.

Mientras que en esta curva el porcentaje optimo esta entre 12 y 16 de flujo por lo que se tomara 4% de porcentaje asphaltico.

Una vez obtenidos los porcentajes óptimos de asfalto, se estableció un valor promedio, el mismo que corresponde al porcentaje óptimo de asfalto en el diseño (4.5 % de asfalto).

Al comparar los resultados obtenidos en laboratorio de las briquetas de estudio con los requerimientos de la normativa AASHTO T-245 para mezclas asfálticas drenantes, se determina que la mezcla se adecua para tráfico de tipo mediano donde el requerimiento exigido es de 1200 lb para la estabilidad, contra los 1968 lb obtenidos del ensayo, y el flujo de 8-16 contra los 16.0 mm.

⁴⁰ Fuente. Elaboracion propia

Resultados de la Evaluación del Contacto Agregado-Agregado

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación de contacto agregado-agregado realizada, expresada en términos de:

- La relación del número de puntos de contacto y el número de partículas de agregado.
- La relación del contenido de vacíos y el número de puntos de contacto obtenidos por la fracción de agregado grueso.

En el grafico 12 se presenta la distribución vertical del número de puntos de contacto cuantificado para cada espécimen estudiado. Estos datos indican que la distribución de puntos de contacto es irregular a lo largo del eje vertical de los especímenes de mezclas drenantes, con una concentración mayor de puntos de contacto en la zona central del espécimen.

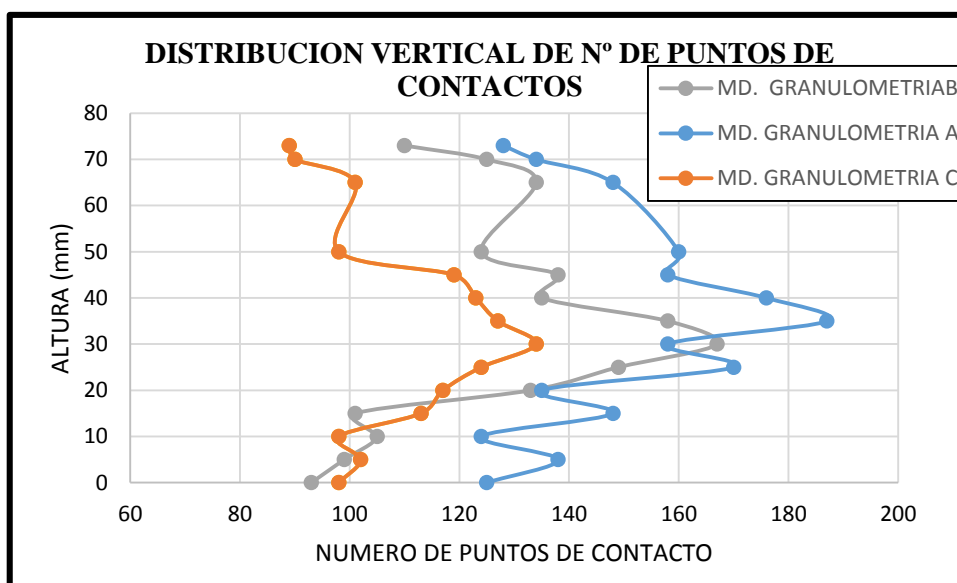


Gráfico 12 Distribución vertical del número de puntos de contacto⁴¹

Considerando que la respuesta mecánica de las mezclas drenantes depende del contacto agregado-agregado alcanzado en la mezcla compactada, se puede inferir que la respuesta mecánica evaluada sobre las briquetas típicamente producidas corresponde a una combinación de condiciones, pobre o mínima respuesta mecánica en los extremos de la briqueta y mejor o máxima respuesta mecánica en la parte central de la briqueta como se observa en el grafico 12.

⁴¹ Fuente. Elaboración propia

El gráfico 13 presenta la distribución vertical del número de partículas de agregado de la fracción gruesa cuantificado para las briquetas analizadas.

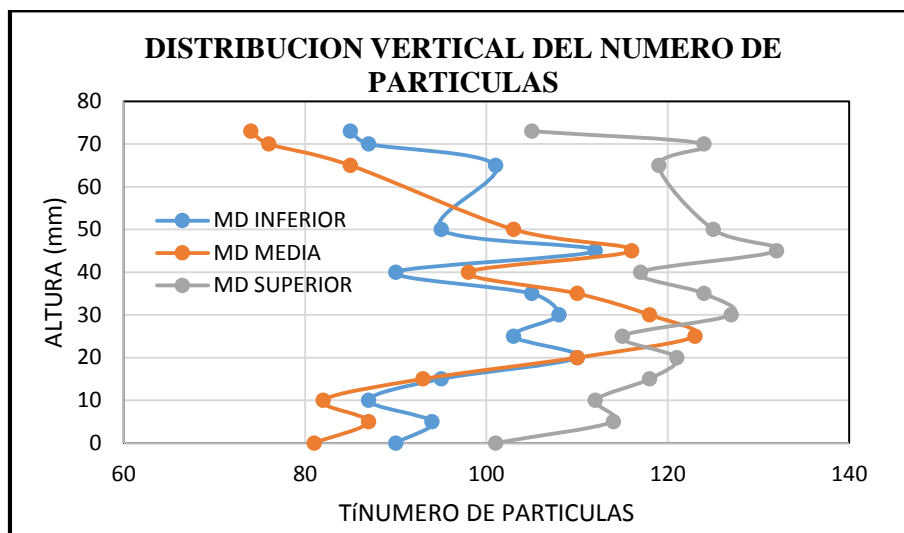


Gráfico 13 Distribución vertical del número de partículas⁴²

En el gráfico 14 muestra la relación del número de puntos de contacto y el número de partículas de agregado cuantificados en las diferentes secciones transversales que dan lugar a las distribuciones verticales mostradas en los gráficos 12 y 13.

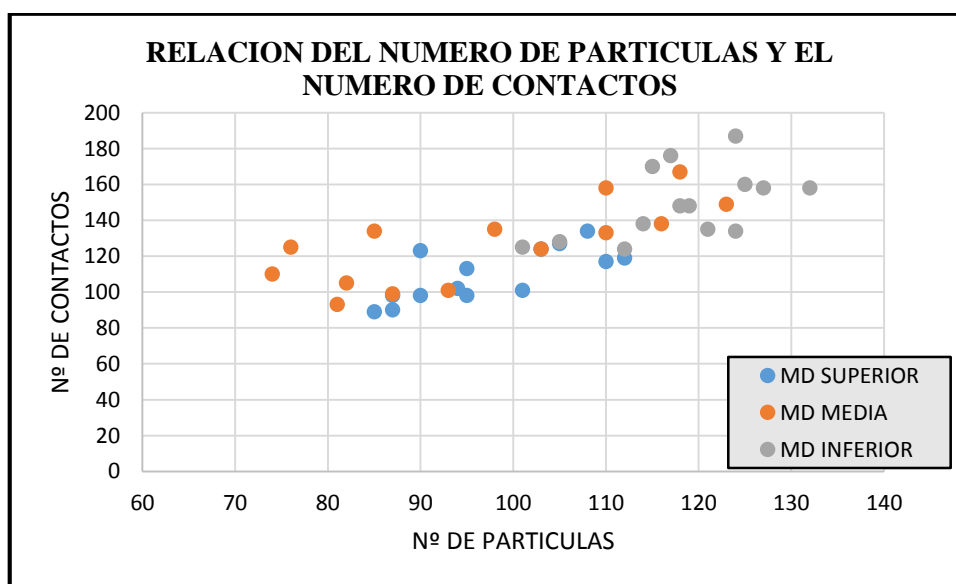


Gráfico 14 Relación del número de puntos y el número de contactos⁴³

⁴² Fuente: Elaboración propia

⁴³ Fuente: Elaboración propia

Las diferencias que se observan entre las mezclas en términos del número de partículas mayor en la mezcla drenante superior en comparación con la mezcla drenante inferior se relaciona con las diferencias obtenidas en términos del número de puntos de contacto (grafico 12) tal como lo muestra el grafico 14. Estos datos sugieren la existencia de una relación directa de las variables; es decir, un mayor número de partículas asociado a una granulometría más fina dentro del huso granulométrico especificado para las mezclas drenantes evaluadas, conduce a un mayor número de puntos de contacto en la mezcla drenante compactada, favoreciendo, en principio, su resistencia a la desintegración.

Adicionalmente, la relación entre el número de puntos de contacto y el contenido de vacíos se presenta en el grafico 15. Si bien el contenido de vacíos especificado para el diseño de la mezcla está en el rango de 16 a 25%, en la gráfica se presenta un rango mayor debido a la heterogeneidad de la distribución vertical de contenido de vacíos que típicamente se presenta en briquetas de mezclas drenantes.

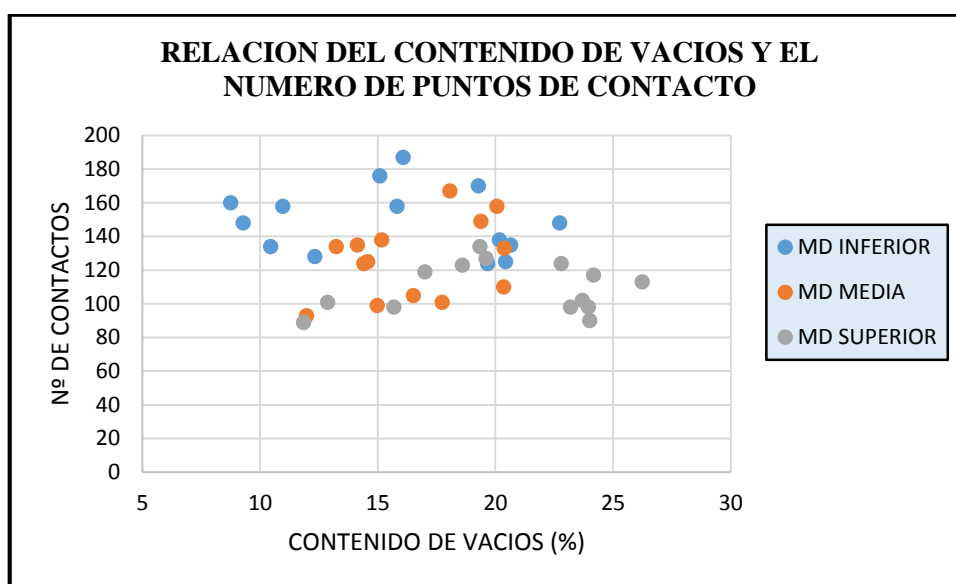


Gráfico 15 Relación del contenido de vacíos y el número de puntos de contacto

Los datos presentados en el grafico 15 consistentemente indican que la disminución del contenido de vacíos está asociada al incremento del número de puntos de contacto adquirido por el agregado grueso. Al incrementarse el grado de compactación de la mezcla, se reduce su contenido de vacíos, por el incremento de sólidos por unidad de volumen, lo que se traduce en el desarrollo de un mayor número de puntos de contacto que favorece la respuesta mecánica de la

mezcla. De esta forma, los resultados aquí reportados aportan sustento adicional a la hipótesis de que la resistencia a la desintegración de la mezcla depende de las condiciones de contacto agregado-agregado desarrolladas en la mezcla y asociadas al contenido de vacíos alcanzado.

Los datos mostrados en el gráfico 15 sugieren que no existe una relación directa entre el contenido de vacíos y número de partículas de agregado. Estos datos indican que la condición de contacto en las mezclas drenantes evaluadas depende no solo de la granulometría de la mezcla, sino del contenido de vacíos alcanzado una vez realizada su compactación.

Análisis comparativo de contenido de vacíos

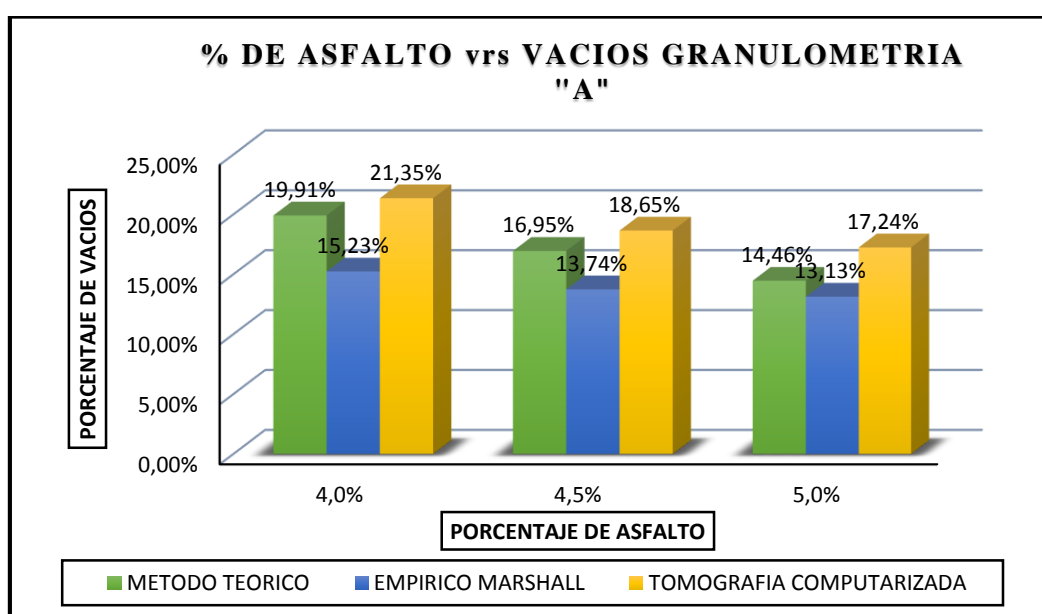


Gráfico 16 Análisis comparativo de vacíos granulometría A⁴⁴

En el gráfico 16 se muestra una comparación de los métodos utilizados para la determinación del porcentaje de vacíos, con una granulometría aproximada al límite superior de la faja granulométrica, donde se puede observar que para los diferentes porcentajes de asfaltos el método Marshall nos da valores menores, esto se debe que al determinar los valores del peso superficialmente seco el agua que es absorbido por las briquetas se escurre con gran facilidad, teniendo un dato no muy próximo al real. Los valores obtenidos del porcentaje de vacíos con la tomografía es más preciso ya que se puede determinar los porcentajes de vacío por secciones transversales a diferentes medidas en una misma muestra, disminuyendo la subjetividad de la

⁴⁴ Fuente: Elaboración propia

obtención del porcentaje de vacíos, considerando que los vacíos en una briqueta pueden no encontrarse conectados entre sí, sino de manera aislada, es que, con la tomografía se identifican estos lugares por lo que se obtiene porcentajes de vacíos mayores a los demás métodos en estudio.

Considerando que el coeficiente de variación para la granulometría tipo A con un porcentaje de asfalto del 4% es de 13.87%, podemos determinar que los resultados obtenidos tienen una baja dispersión y que la media es bastante representativa (ver anexo 4).

Con un porcentaje de asfalto del 4.5% el coeficiente de variación es de 12.38%, por lo que los resultados obtenidos tienen una baja dispersión y la media es bastante representativa (ver anexo 4).

Y con un porcentaje de asfalto del 5% el coeficiente de variación es de 11.46%, por lo que los resultados obtenidos tienen una baja dispersión y la media es bastante representativa (ver anexo 4).

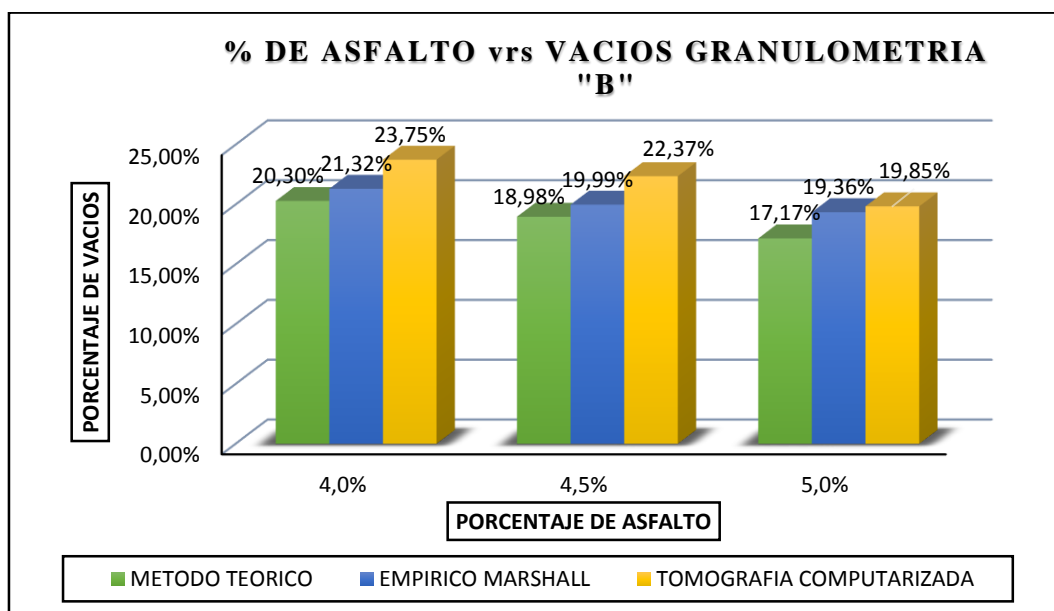


Gráfico 17 Análisis comparativo granulometría B⁴⁵

En el gráfico 17 se muestra una comparación de los métodos utilizados para la determinación del porcentaje de vacíos, con una granulometría aproximada al medio de la faja granulométrica,

⁴⁵ Fuente: Elaboración propia

donde se puede observar que para los diferentes porcentajes de asfaltos no hay una variación considerable.

Considerando que el coeficiente de variación para la granulometría tipo B con un porcentaje de asfalto del 4% es de 6.64%, podemos determinar que los resultados obtenidos tienen una baja dispersión y que la media es altamente representativa (ver anexo 4).

Con un porcentaje de asfalto del 4.5% el coeficiente de variación es de 6.95%, por lo que los resultados obtenidos tienen una baja dispersión y la media es altamente representativa (ver anexo 4).

Y con un porcentaje de asfalto del 5% el coeficiente de variación es de 6.20%, por lo que los resultados obtenidos tienen una baja dispersión y la media es altamente representativa (ver anexo 4).

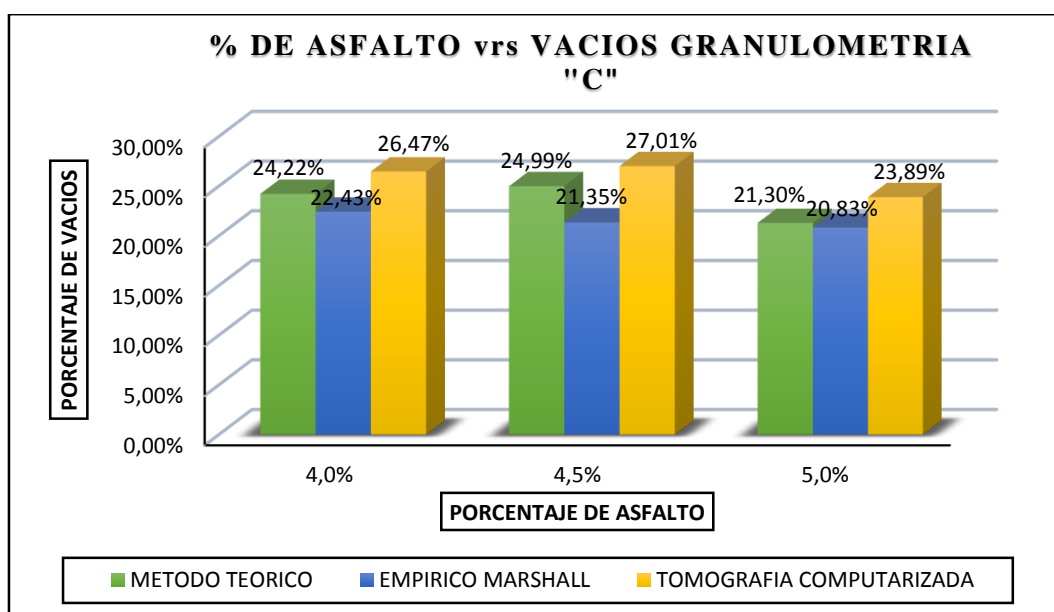


Gráfico 18 Análisis comparativo granulometría C⁴⁶

En el gráfico 18 se muestra una comparación de los métodos utilizados para la determinación del porcentaje de vacíos, con una granulometría aproximada al límite inferior de la faja granulométrica, donde se puede observar que para los diferentes porcentajes de asfaltos el método Marshall nos da valores menores, esto se debe que al determinar los valores del peso

⁴⁶ Fuente: Elaboración propia

superficialmente seco el agua que es absorbido por las briquetas se escurre con gran facilidad, teniendo un dato no muy próximo al real.

Considerando que el coeficiente de variación para la granulometría tipo C con un porcentaje de asfalto del 4% es de 6.78%, podemos determinar que los resultados obtenidos tienen una baja dispersión y que la media es altamente representativa (ver anexo 4).

Con un porcentaje de asfalto del 4.5% el coeficiente de variación es de 9.58%, por lo que los resultados obtenidos tienen una baja dispersión y la media es altamente representativa (ver anexo 4).

Y con un porcentaje de asfalto del 5% el coeficiente de variación es de 6.11%, por lo que los resultados obtenidos tienen una baja dispersión y la media es altamente representativa (ver anexo 4).

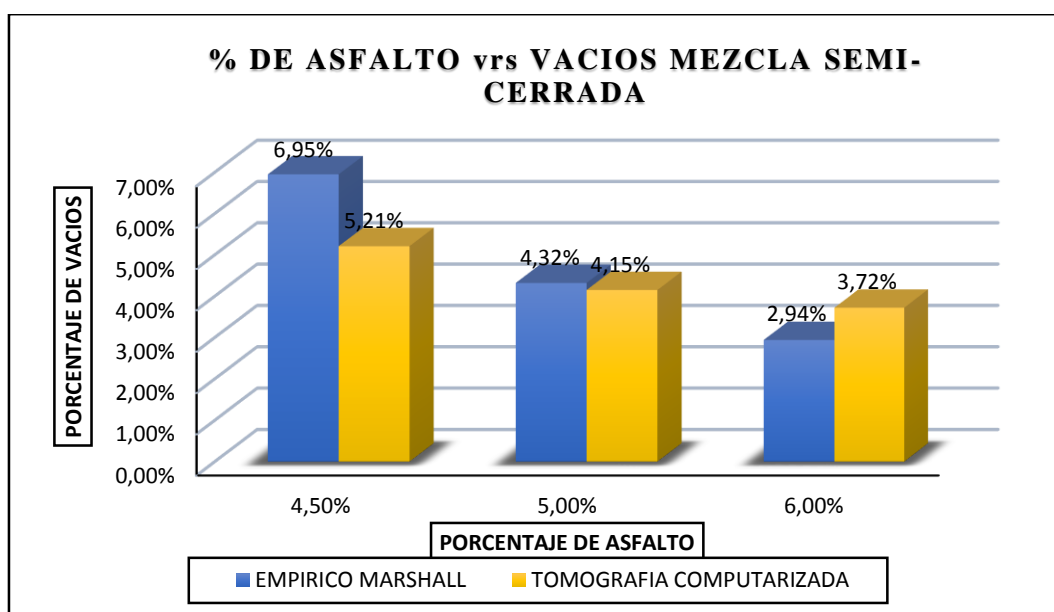


Gráfico 19 Análisis comparativo granulometría semi-cerrada⁴⁷

En el gráfico 19 se muestra una comparación de los métodos utilizados para la determinación del porcentaje de vacíos, en una briketa realizada con mezcla semi-cerrada, donde se puede observar que para los diferentes porcentajes de asfaltos nos da valores próximos entre ellos, siendo el que tiene una mayor diferencia el que contiene un porcentaje de asfalto de 4.5%.

⁴⁷ Fuente: Elaboracion propia

Considerando que el coeficiente de variación para las briquetas con un porcentaje de asfalto del 4% es de 14.30%, podemos determinar que los resultados obtenidos tienen una baja dispersión y que la media es bastante representativa (ver anexo 4).

Con un porcentaje de asfalto del 4.5% el coeficiente de variación es de 2%, por lo que los resultados obtenidos tienen una baja dispersión y la media es altamente representativa (ver anexo 4).

Y con un porcentaje de asfalto del 5% el coeficiente de variación es de 11.71%, por lo que los resultados obtenidos tienen una baja dispersión y la media es bastante representativa (ver anexo 4).

CAPITULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

1.1 Conclusiones.

- Se determinó que el contenido óptimo de asfalto para las mezclas de estudio es de 4.5%
- La evaluación realizada sustenta que el número de puntos de contacto de los agregados en las mezclas drenantes evaluadas se incrementa al elevarse el número de partículas de agregado en función de la granulometría del agregado. Adicionalmente, al decrecer el contenido de vacíos se reportó un incremento del número de puntos de contacto.
- Se pudo conocer las ventajas y desventajas que posee una mezcla drenante para su aplicabilidad en capas de rodadura.
- Se determinó que la relación del número de puntos de contacto y el número de partículas en la briqueta es que a mayor número de partículas existe mayor número de contactos.
- Se determinó que el contenido total de vacíos de las briquetas con una granulometría de tipo A varía desde 14.77% a 20.07%, con una granulometría de tipo B varía desde 15.36% a 21.27% y con una granulometría de tipo C desde 21.04% a 24.87%.
- Los valores obtenidos del porcentaje de vacíos con la tomografía computarizada es un método que se puede aplicar ya que sus resultados obtenidos no varían considerablemente con relación a los métodos convencionales utilizados. Incluso con esta metodología se disminuye la subjetividad de la obtención del porcentaje de vacíos, considerando que los vacíos en una briqueta pueden no encontrarse conectados entre sí, sino de manera aislada, es que, con la tomografía se identifican estos lugares por lo que se obtiene porcentajes de vacíos más próximos a los reales.
- Se determinó que la relación del contenido de vacíos y el número de puntos de contacto es inversamente proporcional ya que cuando existe una disminución del

contenido de vacíos existe un incremento del número de puntos de contacto adquirido por el agregado grueso.

- Considerando el desgaste realizado por el ensayo de cántabro a 300 revoluciones, se puede establecer que para que la mezcla drenante cumpla con la resistencia a la desintegración menor al 25% se debe trabajar con un porcentaje de contenido de asfalto mayor o igual a 4.5% para las diferentes franjas de granulometrías utilizadas en el presente trabajo.
- La Tomografía es una técnica funcional para la evaluación de la estructura interna de mezclas asfálticas drenantes con múltiples aplicaciones útiles para el mejoramiento de la caracterización de estos materiales de pavimentación.

1.2 Recomendaciones

- Realizar una investigación y sondeo a un tramo con mezcla drenante en la carpeta de rodadura, para determinar la pérdida de las propiedades drenantes a lo largo de la vida útil de esta.
- Estos resultados sugieren la posibilidad de optimizar a futuro la respuesta mecánica de las mezclas drenantes, maximizando el número de puntos de contacto, en función de un análisis más detallado de la granulometría de las mezclas. Adicionalmente, los resultados enfatizan la necesidad de controlar en campo el contenido de vacíos actualmente evaluado en muchos casos mediante inspección visual para garantizar indirectamente el mayor número de puntos de contacto posible y de esta forma asegurar una adecuada resistencia a la desintegración en las mezclas drenantes.