

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

Los pavimentos son estructuras diseñados para soportar esfuerzos y deformaciones, generados por las cargas dinámicas (vehículos) y las condiciones climáticas a las cuales se encuentran sometidos; éstos son cambiantes y alteran las propiedades mecánicas químicas y termodinámicas de los materiales que componen dicha estructura.

De la caracterización de las propiedades de los materiales empleados en las mezclas asfálticas dependerá garantizar diseños confiables, estructuras durables y planes de rehabilitación efectivos, por lo cual se hace necesario un estudio más a detalle de cada componente de las mezclas asfálticas, cumpliendo las especificaciones establecidas por las normas en las que se rigen los diseños de vías en nuestro país.

Siempre nos hemos cuestionado qué es lo que realmente pasa dentro de una mezcla asfáltica, si realmente se cumplen los parámetros considerados en el diseño, en el caso de presentarse fallas en la carpeta asfáltica cuál fue la causa de dicha falla; con el avance de la tecnología se ha logrado una mejora en las técnicas usadas para caracterización de materiales, debido a la necesidad de reevaluar la validez de los métodos de diseño de mezclas asfálticas y el mejor conocimiento sobre los factores y mecanismos que afectan el comportamiento y respuesta de los materiales empleados.

En el pasado, la observación de lo que ocurría dentro de la estructura de las mezclas asfálticas solía ser prácticamente imposible de observar sin recurrir a ensayos destructivos, ahora podemos aplicar el análisis de la estructura interna de mezclas asfálticas a partir de la tomografía computarizada de Rayos-X (TC-RX), ensayo no destructivo de fácil uso con el que se obtienen resultados confiables rápidamente.

Esta técnica nos permitirá estudiar el contenido, tamaño, distribución, conectividad de los vacíos y el arreglo de los agregados, la relación de estas variables con la susceptibilidad al deterioro por la presencia de humedad, la capilaridad y la permeabilidad de las mezclas; debido a que la resistencia a la desintegración depende de las condiciones de contacto agregado-agregado desarrollados en la mezcla y asociadas al contenido de vacíos almacenado.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1. Situación Problemática

La observación del acomodo de los agregados y de la película asfáltica dentro de las mezclas asfálticas definirá su desempeño, por lo que garantizar una óptima distribución de los componentes de las mezclas asfálticas es de importancia para el funcionamiento de la misma.

Los parámetros usados en el diseño de mezclas asfálticas varían debido a que las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados no son iguales, varían según el banco de materiales utilizado y según el cemento asfáltico usado, por lo que la visualización de la estructura interna formada por la mezcla asfáltica diseñada es una metodología que permitirá observar lo que sucede dentro de la misma.

El tránsito de la humedad por las rutas capilares formadas por los vacíos en la estructura interna de las mezclas asfálticas suelen ser un factor que limita la vida útil de las mismas, por lo que determinar si el contenido de vacíos adoptado como óptimo se cumple a cabalidad, observar la relación que tendría la granulometría, la compactación con el contenido de vacíos.

El trabajo agregado-agregado dentro de las mezclas asfálticas define factores que influyen en la durabilidad y la funcionalidad que tendrán las mezclas asfálticas a lo largo de su vida útil, por lo que su observación es de importancia ya que posibilitaría determinar algunas causas y efectos de falla de las superficies de los pavimentos flexibles; ésto sería posible mediante el uso de imágenes de la estructura interna de

las mezclas asfálticas, con lo que podríamos modelar una estructura que cumpla con las especificaciones técnicas y de calidad que se necesitan.

1.2.2. Problema

¿Es posible analizar las características y las propiedades que desarrollan las mezclas asfálticas en su estructura interna a partir del trabajo de sus componentes para así reevaluar las metodologías de diseño empleados sin recurrir a ensayos destructivos?

1.3. JUSTIFICACIÓN

Si aplicamos la metodología de análisis de las estructuras internas de las mezclas asfálticas con tomografías computarizadas rayos X (TC-RX) (una técnica nueva no destructiva), podremos observar si se cumplen o no ciertos parámetros de diseño; la influencia del contenido y distribución de vacíos que son parámetros que condicionan el desempeño mecánico de las mezclas.

Hasta ahora, esta observación se había tornado limitativa pero el avance de la tecnología permite emplear nuevos métodos de observación que nos proporciona un informe de que es lo que sucede en el interior de la mezcla, el trabajo que desarrollan los componentes de las mezclas, el trabajo agregado-agregado.

Con esta metodología podremos determinar las características reales de las mezclas asfálticas a partir de sus propiedades.

La observación del contacto que hay entre agregados y la película asfáltica, podrá ser analizado para así determinar su influencia en la presencia de tubos capilares que pueden determinar la absorción de agua y por supuesto este componente agua determina la vida útil del pavimento.

Por lo antes señalado se puede verificar que esta técnica de imágenes computarizadas, podría ser un método que permita realizar el diseño de las mezclas asfálticas con mayores garantías.

Podría adoptarse esta metodología como un método que haga posible un control y fiscalización de la calidad de las mezclas asfálticas, ya que la carpeta asfáltica es la capa más importante de las carreteras, susceptible a deterioros y fallas.

1.4. ALCANCE

El ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA INTERNA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS A PARTIR DE TOMOGRAFÍAS COMPUTARIZADAS DE RAYOS-X (TC-RX), es una metodología relativamente nueva en nuestro ámbito, que realiza un reconocimiento de características de los vacíos y contacto agregado-agregado, tratando de evaluar las metodologías de diseño que empleamos en nuestro medio, ya que éste permitirá tener una mayor confiabilidad en los parámetros considerados para el diseño y evaluación de las mezclas asfálticas.

La Tomografía de Rayos-X (TC-RX) está orientada a evaluar la estructura interna a partir de imágenes bidimensionales en escala de grises.

Las imágenes computarizadas serán analizadas por un software IMAGE-J basado en programación JAVA que permite observar y analizar el contenido de vacíos y el contacto agregado-agregado en las mezclas asfálticas, la distribución de las partículas dentro de estas a través de imágenes binarias pixeladas.

Para la presente investigación se procede a utilizar áridos de la región, utilizados en las plantas asfálticas escogidas como banco de datos.

Se usa cementos asfálticos convencionales: BETUPEN 85/100 y cementos asfálticos modificados: BETUFLEX 60/85.

Se hace uso de un tomógrafo el cual es utilizado en el campo médico, que nos proporcionara imágenes que hace posible la visualización de la estructura interna de las mezclas asfálticas.

Se pretende evaluar esta metodología de análisis como un modelo que pueda ser utilizado para controlar la calidad de las carpetas asfálticas de las carreteras, buscando siempre la comodidad del usuario.

En el Capítulo I, se presenta la justificación de la decisión de realizar el análisis de las estructuras internas de las mezclas asfálticas; determinando los objetivos los cuales serán alcanzados con la investigación, son identificadas las variables dependientes e independientes a analizar; se delimita el área de estudio, la población, muestra y muestreo.

En el Capítulo II, se sustenta teóricamente la investigación del análisis de la estructura interna de las mezclas asfálticas, basado en bibliografía existente sobre el campo de las mezclas asfálticas, se señalan las normas vigentes dentro de las cuales se maneja esta investigación.

Se da a conocer la metodología de TOMOGRAFÍAS computarizadas de RAYOS-X, su campo aplicativo y el procedimiento a seguir para su uso como un método evaluativo de mezclas asfálticas.

En el Capítulo III se da inicio a la parte investigativa del presente proyecto para lo cual se realizan:

- Los ensayos normados por AASHTO - ASTM tanto para áridos, como para cementos asfálticos.
- La aplicación de la metodología MARSHALL para el diseño de mezclas asfálticas, las cuales deben ser estable y trabajables; la gradación de los materiales deben cumplir con las especificaciones normadas para así poder brindar calidad en las carpetas asfálticas.
- La preparación de briquetas compactadas con la mezcla asfáltica final la que se encuentra con los contenidos óptimos de cemento asfáltico, para ser llevadas al tomógrafo para su análisis.
- Obtención de núcleos de proyectos de pavimentación para analizar si la metodología de TC-RX es aplicable en éstos.

En el Capítulo IV se analizan los resultados obtenidos para los porcentajes de vacíos y contacto agregado-agregado, y las posibles relaciones existentes entre los vacíos y el contacto agregado-agregado, a partir de imágenes Tomográficas computarizadas de Rayos-X mediante análisis binario de las imágenes.

1.5. DISEÑO TEÓRICO

1.5.1. Objetivos

1.5.1.1. Objetivo general

Analizar las características internas y las propiedades de las mezclas asfálticas empleando tomografías computarizadas de rayos-X (TC-RX) con el fin de evaluar sus características internas sobre el porcentaje de vacíos y el contacto agregado-agregado.

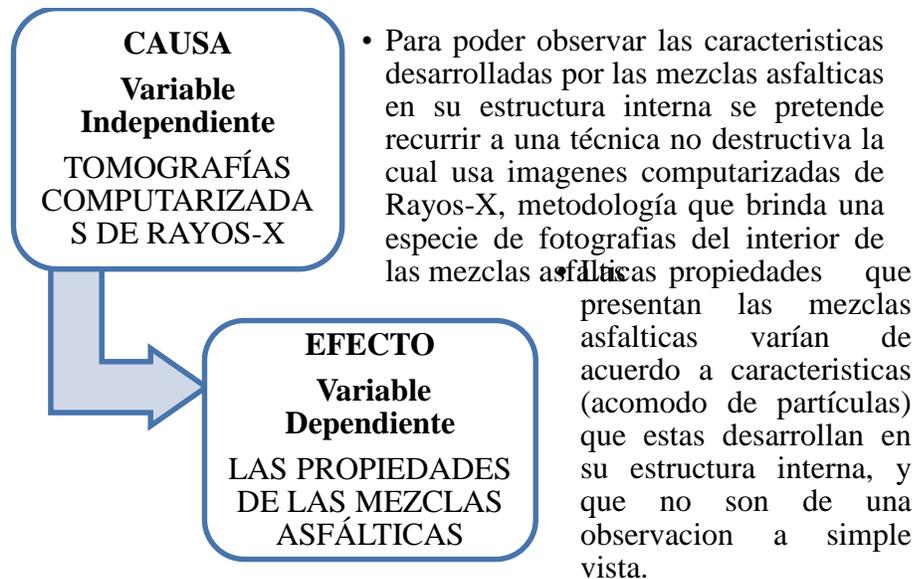
1.5.1.2. Objetivos específicos

- Visualizar y evaluar las mezclas asfálticas sin recurrir a ensayos destructivos.
- Realizar el compactado de briquetas para determinar las características que éstas presentan al haberse realizado en condiciones prácticamente ideales.
- Extraer núcleos de proyectos de pavimentado para realizar la evaluación de la mezcla utilizada mediante imageneología (TC-RX).
- Obtener imágenes de la estructura interna de las mezclas asfálticas haciendo uso de un tomógrafo que comúnmente es usado en el campo médico.
- Analizar las imágenes obtenidas con las tomografías computarizadas de rayos-X con algoritmos computacionales que permitan relacionar algunas propiedades presentes en las mezclas asfálticas.
- Comparar el porcentaje de contenido de vacíos obtenidos del análisis con tomografías computarizadas de rayos-X, con el valor obtenido de ensayos de laboratorio.
- Determinar si existe o no relación entre el porcentaje de vacíos y el número de contactos en mezclas asfálticas calientes.

1.6. HIPÓTESIS

Si se hace el análisis de la estructura interna de las mezclas asfálticas a partir de la Tomografía computarizada de Rayos-X (TC-RX), entonces se podrá obtener las características reales que éstas presentan en su estructura interna a partir del análisis de las imágenes mediante algoritmos computacionales, que permiten la visualización detallada de la mezcla en su interior.

1.7. DEFINICIÓN DE VARIABLES



1.8. DISEÑO METODOLÓGICO

1.8.1. Unidades de Estudio

Mezclas Asfálticas

1.8.2. Población

Características y propiedades que presentan las mezclas asfálticas en su estructura interna.

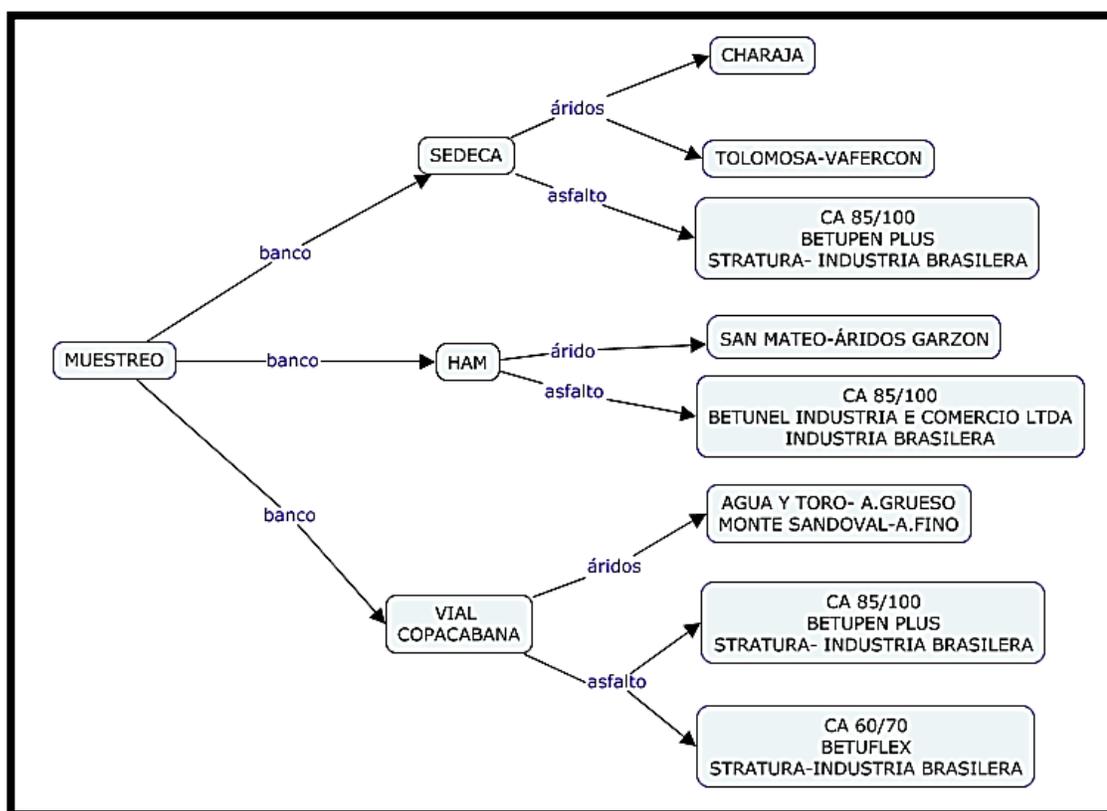
1.8.3. Muestra

Mezclas asfálticas con asfalto convencional: BETUPEN 85/100 y asfalto modificado: BETUFLEX 60/85.

1.8.4. Muestreo

Para el proceso investigativo se utiliza para el muestreo de materiales áridos, bancos regionales los cuales proporcionan material a los principales ejecutores de mezclas asfálticas en nuestra región; en cuanto al cemento asfáltico se trabajara con cemento asfáltico convencional BETUPEN 85/100 el cual es usado para zonas donde el clima es templado y se usa también cemento asfáltico modificado BETUFLEX 60/85 el cual es utilizado en la zona alta donde las temperaturas son bajas.

CUADRO 1.8.1. MUESTREO DE MATERIALES¹

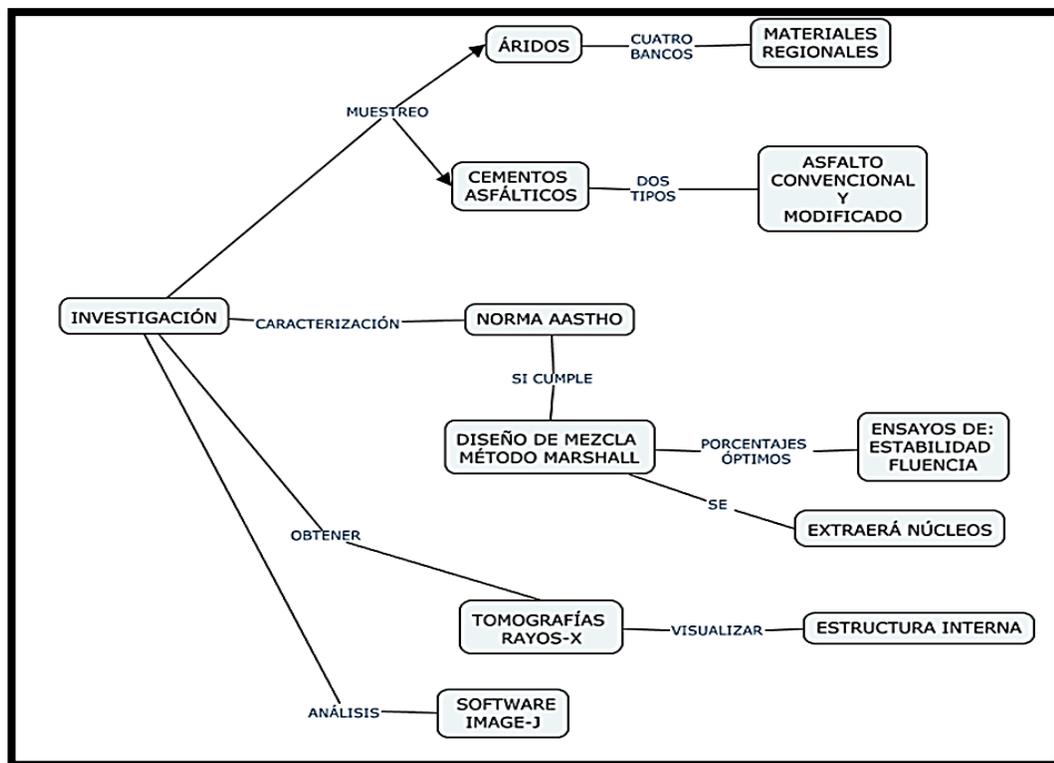


¹ FUENTE: Elaboración Propia.

1.8.5. Métodos y Técnicas de Investigación

- La caracterización de materiales se realiza bajo las normas AASTHO y ASTM, bajo las cuales se diseñan las mezclas asfálticas en nuestro país.
- Para el diseño de mezclas asfálticas se hará uso de la metodología MARSHALL, la cual se basa en ensayos de densidad, estabilidad y fluencia.
- Extracción de núcleos de proyectos de pavimentación.
- Se realizan tomografías computarizadas, que son analizadas con el software IMAGE-J de programación JAVA basado en imágenes pixeladas.
- Se aplica estadística a los datos medios obtenidos mediante el análisis de imagenología.

CUADRO 1.8.2. PROCESO INVESTIGATIVO²



² FUENTE: Elaboración Propia

1.8.6. Técnicas de Muestreo

- Para áridos

Los áridos serán extraídos de plantas chancadoras y /o acopios de materiales.

- Para cementos asfálticos

Para cementos asfálticos que proceden barriles o tambores el nivel de extracción es del núcleo 2kg por cada unidad seleccionada, el cual debe ser envasado en lata de boca ancha con tapa de presión.

Los envases para muestras deben ser nuevos. No los lave, no enjuague ni seque con telas engrasadas. No use envases que presenten evidencias de fundente de soldadura o que no estén limpios y secos. La tapa debe cerrarse herméticamente.

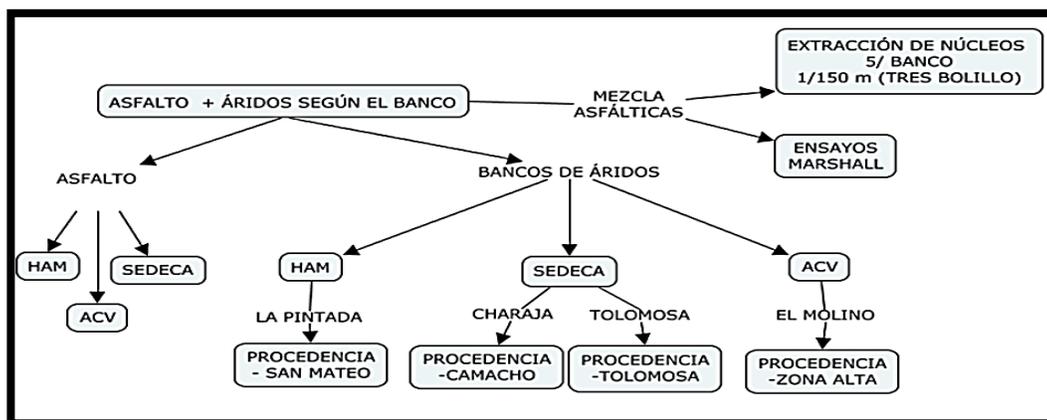
- Extracción de núcleos

Se extraen núcleos para comparar los datos de campo con los de laboratorio y así poder realizar un análisis más a detalle de la estructura interna de las mezclas.

- Muestreo de briquetas

Una vez encontrados los porcentajes óptimos de las mezclas asfálticas, se realizara el compactado de briquetas con dichos porcentajes.

CUADRO 1.8.3. ESQUEMA DE MUESTREO³



³ FUENTE: Elaboración Propia

1.8.7. Proceso de Obtención de Datos

MATERIALES

- Para la caracterización de áridos y cementos asfálticos se hará uso de los equipos con los que cuenta el laboratorio de Suelos y Hormigones, y del laboratorio de Asfaltos de la UAJMS, los cuales están regidos bajo normas AASHTO y ASTM

DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

- Se usa el método Marshall, como método de diseño de mezclas asfálticas.
- Se cuenta con el equipo Marshall de laboratorio bajo normas establecidas.
- Se realizarán los ensayos de fluencia y estabilidad Marshall

EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS

- Con el extractor de núcleos obtendremos testigos para comparar la situación de la estructura interna de las mezclas asfálticas in situ.

TOMOGRAFÍAS RAYOS-X

- Se hará uso de TOMÓGRAFO, equipo clínico que proporcionará las imágenes computarizadas de la estructura interna de las briquetas compactadas

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA INTERNA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

- Se realizará el análisis de las imágenes obtenidas por tomografías computarizadas con el software IMAGE-J que nos permite determinar las propiedades y las características de la estructura interna de las mezclas asfálticas

1.8.8. Procesamiento Estadístico

Una vez concluidas las etapas de obtención de datos a partir de las tomografías (TC-RX), se dará inicio a una de las etapas más importante de toda investigación, el análisis de datos. Se determinará como analizar los datos y qué herramientas se utilizaran, buscando que éstas sean las más adecuadas.

El análisis de datos es el precedente para la actividad de interpretación y la interpretación se realiza en términos de resultados de la investigación.

La interpretación se realiza en dos etapas:

- Interpretación de las relaciones entre las variables y los datos que las sustentan con fundamentar algún nivel de significancia.
- Determinar el grado de generalización de los resultados de la investigación.

Medidas de tendencia central

- **Moda:** Es la categoría o puntuación que ocurre con mayor frecuencia.
- **Mediana:** 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, ésta refleja la posición intermedia de la distribución.
- **Media:** Medida de tendencia central más utilizada y puede definirse como el promedio de una distribución.

Es calculada a partir de la suma de todos los valores dividida por el número de muestras, expresado en la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad \text{Ecuación 1}$$

La fórmula simplificada de la media es:

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

Fórmula para el cálculo de la media a partir de datos agrupados de una distribución de frecuencias:

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

Dónde:

F_i = Frecuencia de la i -ésima clase.

T_i = Marca de clase de la i -ésima clase

Se establecen diagramas de dispersión que nos permiten tener una idea bastante aproximada de la relación entre dos variables, a través de la cual podemos establecer una regresión de datos.

Medidas de Dispersión

- **Varianza:** Mide la dispersión media de los valores de una variable con respecto a la media, y es calculada mediante la siguiente ecuación.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2 * f_i}{n} \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

σ^2 : Varianza

X_i : Valor de la variable X

\bar{X} : Media aritmética

f_i : Frecuencia absoluta de la observación X_i

n : tamaño de la muestra

m : Numero de agrupamientos o intervalos.

- **Desviación:** Es la raíz cuadrada de la varianza, es el promedio de desviación de las puntuaciones con respecto a la media.

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

- **Correlación:** Es un indicador de la fuerza de la relación entre las variables X y Y analizadas, puede asumir valores entre -1 y 1 para correlación negativa y positiva perfecta respectivamente.
- **Regresión:** Aplicada para investigar la dependencia de una variable dependiente en función de una variable independiente X, es decir $Y=f(X)$.

Y= Variable dependiente que se desea explicar o predecir, también llamado regresor o respuesta.

X= Variable independiente, también se llama variable explicativa o predictor.

Una regresión puede ser lineal o curvilínea, ésta es determinada en función al valor que se tenga de correlación ya que siempre se debe tratar de acercarse a una correlación perfecta.

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO DEL ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA INTERNA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS A PARTIR DE TOMOGRAFÍAS COMPUTARIZADAS DE RAYOS-X

2. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

2.1. DEFINICIÓN DE PAVIMENTO

El pavimento se define como una estructura de múltiples capas de espesores finitos y de materiales apropiados , construido sobre una superficie final de terraplén, destinado a resistir los esfuerzos producidos por el tráfico de vehículos y por el clima al cual se encuentra sometido; buscando mejorar las condiciones de rodadura, propiciando siempre la comodidad del usuario, seguridad y economía.

Los pavimentos se clasifican tradicionalmente en dos tipos básicos: pavimentos rígidos y pavimentos flexibles; denominados así según sea el tipo de material utilizado.

En el caso de pavimentos rígidos son aquellos en los que se emplean placas de concreto de cemento portland, para pavimentos flexibles se usan materiales provenientes de la refinación del petróleo por lo que también son llamados pavimentos asfálticos.

2.2. PAVIMENTO FLEXIBLE

También llamados pavimentos asfálticos son aquellos que su revestimiento está compuesto por una mezcla constituida básicamente de agregados pétreos y ligante asfálticos. Está formado por cuatro capas principales: revestimiento asfáltico, base, sub-base y el fortalecimiento de la subrasante; dependiendo de la disponibilidad de los materiales y del tráfico registrado puede tener la ausencia de alguna de las capas.

Las capas de la estructura reposan sobre la subrasante la cual es determinada después de un diseño geométrico que es definido por cortes y rellenos.

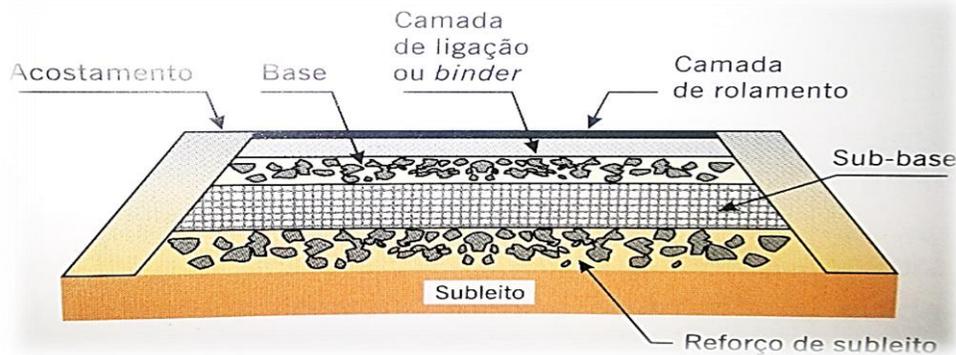


Figura 1.8.1 Corte transversal de una carretera⁴

El revestimiento asfáltico de la capa superior destinada a resistir directamente las acciones de tráfico y transmitir las de forma atenuada a las capas inferiores, impermeabilizar un pavimento es darle mejores condiciones de rodamiento (confort y seguridad).

Las tensiones producidas en la capa asfáltica por las cargas de tráfico están asociadas a la fatiga que se produce en esta capa, la cual se puede evidenciar debido al envejecimiento del ligante asfáltico. *“Limitar las tensiones y deformaciones de la estructura del pavimento por medio de la combinación de materiales y espesores de las capas constituyentes es el objetivo de la mecánica de pavimentos”* (Medina⁵,1997).

2.3. MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas bituminosas se emplean desde principios de siglo en las capas superiores de los pavimentos, no sólo de carreteras y aeropistas, sino también en otro tipo de infraestructuras.

⁴ FUENTE: Pavimentación Asfáltica, libro de formación básica para ingenieros, 4ta ed. 2010.

⁵ Mecánica de pavimentos.1.ed. Rio de janeiro 1997

Una mezcla asfáltica o bituminosa consiste en la combinación de agregados pétreos y ligantes asfálticos de diversos tipos y espesores, que mezclados a altas temperaturas forman una película continua que envuelve los áridos. Los áridos son un material elasto-plástico y el betún visco-elástico, por lo que se considera que una mezcla asfáltica es un material termo-visco-elasto-plástico. Estas mezclas se fabrican en centrales fijas o móviles y posteriormente se transportan a obra para su extendido y compactación.

Debido a las características del betún, las mezclas tienen un comportamiento que depende de la temperatura y la velocidad de aplicación de las cargas. Sólo en determinadas condiciones se puede considerar que tienen un comportamiento elástico y lineal. Estas condiciones son cuando las temperaturas son bajas y la velocidad de aplicación de las cargas es elevada.

2.3.1. Clasificación de las Mezclas Asfálticas

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

2.3.1.1. Por fracciones de agregado pétreo empleado.

Esta clasificación está dada de acuerdo a la fracción del agregado pétreo

- 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.

2.3.1.2. Por temperatura de puesta en obra

- Mezclas asfálticas en caliente: consiste en una combinación de agregados uniformemente mezclados recubiertos por ligante asfáltico. Para secar los agregados y obtener suficiente fluidez del cemento asfáltico como para lograr una adecuada trabajabilidad y mezclado, tanto el agregado como el asfalto deben ser calentados antes del mezclado; de ahí el término de mezcla en caliente; éstas son fabricadas en un rango de 150 grados centígrados de

temperatura y su puesta en obra también es a temperaturas superiores a las ambientes, caso contrario éstas no podrían ser extendidas y menos aún compactarse adecuadamente.

- Mezclas asfálticas en frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

2.3.1.3. Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica

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

- Mezclas cerradas o densas: La proporción de vacíos no supera el 6%.
- Mezclas semi-cerradas o semi-densas: la proporción de vacíos esta entre el 6% y el 10%.
- Mezclas abiertas: La proporción de vacíos supera el 12%.
- Mezclas porosas o drenantes: la proporción de vacíos es superior al 20%.

2.3.1.4. Por el tamaño máximo de agregado pétreo

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

2.3.1.5. 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.
- Mezclas sin esqueleto mineral: no poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla.

2.3.1.6. 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.

2.3.2. Características de las Mezclas Asfálticas

2.3.2.1. Densidad de la mezcla

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la 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 del diseño de mezclas, la densidad de la mezcla compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico. La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m³). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Ésto se debe a que rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

2.3.2.2. Vacíos de aire

Los vacíos de aire son espacios 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 donde pueda fluir el asfalto durante la compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales esta entre 3% y 5%, dependiendo del diseño específico.

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

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. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos; preferiblemente del 8%.

2.3.2.3. Vacíos en el agregado mineral

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

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde 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 VMA los

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 (fracciones muy finas de agregado que pasan el tamiz de 0.075 mm (N°200)). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte el 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 o relleno mineral causa cambios en las propiedades de las mezclas, haciendo variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario, para corregir la situación, probablemente la empeorará.

En vez de hacer ajuste arbitrario se deberá efectuar un muestreo y 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 usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Ésto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan 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 adicionado a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfaltos el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre la superficie 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 agregados, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas.

2.3.3. Propiedades de las Mezclas Asfálticas

Las propiedades de las mezclas asfálticas dependen de varios factores entre ellos: el medio ambiente; magnitud, tiempo de aplicación y frecuencia de las cargas de los vehículos y estado de tensiones. Cada tipo de mezcla asfáltica tiene propiedades intrínsecas diferentes. Esto hace que sus campos de aplicación sean también diferentes. En principio, no es posible proyectar una mezcla que satisfaga plenamente todas las propiedades, debido a que algunas de ellas son contrapuestas y porque la importancia de unas u otras depende de la funcionalidad y estructura del firme. Para conseguir que prevalezcan unas determinadas propiedades, por lo que las cualidades de los materiales constituyentes son de importancia relevante, su dosificación y las condiciones de fabricación y puesta en obra de la mezcla.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que las mezclas bituminosas son tanto en carreteras como en otras infraestructuras no son simplemente unos materiales de construcción con una determinada misión estructural. Como pavimento deben satisfacer una serie de requerimientos no estructurales en consonancia con su función y su entorno. Por ello deben considerarse también propiedades como la luminosidad, color, sonoridad, limpieza, etc.

Las principales propiedades de las mezclas asfálticas son las siguientes:

2.3.3.1. Estabilidad

Es la capacidad de las mezclas bituminosas de soportar cargas y resistir las tensiones a las que se ve sometida, con unos valores de deformación tolerables. Es una representación empírica de la resistencia de material, combinación del rozamiento interno y la cohesión.

Suele evaluarse mediante ensayos de base fundamentalmente empírica. Los más conocidos son el ensayo Marshall para mezclas gruesas y el Hubbard-field para mezclas finas. En todos ellos las probetas son llevadas a rotura mediante una sollicitación típica de cada ensayo. La carga de rotura es lo que se denomina estabilidad de la mezcla, que depende de la textura superficial, granulometría del agregado, forma de las partículas, densidad de la mezcla y contenido de asfalto. Es una combinación de la resistencia friccional y de la trabazón del agregado en la mezcla.

La resistencia friccional aumenta con la rugosidad superficial de las partículas del agregado. También aumenta con el área de contacto entre partículas. La resistencia por trabazón depende del tamaño y forma de las partículas. Para cualquier agregado dado, la estabilidad aumenta con la adecuada compactación. Excesivo asfalto en la mezcla tiende a lubricar las partículas y a disminuir la fricción interna del esqueleto.

La cohesión es la fuerza aglutinante propia de una mezcla asfáltica para pavimentos. El asfalto sirve para mantener las presiones de contacto, desarrolladas entre las partículas de agregado. La cohesión varía directamente con la intensidad de la carga, el área cargada y la viscosidad del asfalto, varía inversamente con la temperatura, la cohesión aumenta con el incremento del contenido asfáltico hasta un máximo y luego decrece.

2.3.3.2. Resistencia a las deformaciones plásticas

La aplicación de las cargas a baja velocidad y a las altas temperaturas produce una acumulación de deformaciones de tipo plástico debido al comportamiento visco-

elasto-plástico de las mezclas bituminosas. Si la relación filler/betún no es la correcta o no se tienen características reológicas adecuadas se pueden producir fluencia del material.

Este fenómeno tiene su manifestación típica en las denominadas roderas, que son deformaciones plásticas longitudinales que se pueden llegar a producir en determinadas mezclas en las zonas de rodadura de los vehículos pesados.

En otras ocasiones, el fenómeno de deformación plástica se pone de manifiesto mediante arrollamientos o resaltos transversales, como si el pavimento se comportase como una alfombra arrugada. Esto puede ocurrir en zonas de parada de semáforos en calles con pendiente pronunciada.

A veces, si la pendiente es reducida los arrollamientos no tienen lugar pero existe una fluencia de la mezcla que se revela por discontinuidades más o menos erráticas en las marcas viales. En estos casos, la insuficiente resistencia a las deformaciones plásticas se debe no sólo a una dosificación inadecuada de la mezcla, sino también a una mala adherencia a la capa subyacente.

Por último cabe señalar que también son deformaciones plásticas las provocadas por el fallo de las capas inferiores, que producen en la mezcla bituminosa una deformación superior a la correspondiente al límite elástico. Este tipo de deformaciones son características por su amplitud y su gran radio de curvatura.

2.3.3.3. Resistencia a la fatiga

Capacidad del pavimento asfáltico de soportar flexiones repetidas causadas por el pasaje de las cargas de ruedas. Las pruebas han demostrado que la cantidad de asfalto es extremadamente importante cuando se considera la resistencia a la fatiga en una mezcla para pavimentación. Como regla general, cuando mayor es el contenido de asfalto, mayor es la resistencia a la fatiga. Las pruebas indican que las mezclas de gradación cerrada tienen mayor resistencia a fatiga que las de gradación abierta. A la mezcla deben incorporarse agregados bien graduados que permitan un mayor

contenido de asfalto sin causar exudación o afloramiento en el pavimento compactado.

A bajas temperaturas y altas velocidades el comportamiento de la mezcla bituminosa es fundamentalmente elástico, pero la repetición de cargas generalmente muy inferiores a la de rotura, se produce un agotamiento progresivo por fatiga del material.

La fatiga se traduce en un aumento de las deformaciones elásticas en superficie, y cuando se llega a un avanzado estado de la misma se pueden observar agrietamientos generalizados denominados comúnmente piel de cocodrilo.

La determinación de la resistencia a fatiga de una mezcla bituminosa se lleva a cabo en laboratorio sometiendo a las probetas a ensayos de carga repetida. Para diferentes deformaciones radiales impuestas se obtiene el número de aplicaciones de carga que conduce a la rotura del material.

2.3.3.4. Durabilidad

Propiedad de una mezcla asfáltica que indica su capacidad de resistir desintegraciones debidas al tránsito y al clima. El deterioro debido al clima se basa en los cambios de las características del asfalto, tales como su oxidación y volatilización, que determina una alteración del pavimento y agregados sumado, a la acción del agua, incluso su congelamiento y deshielo.

La durabilidad se incrementa por lo común mediante aumento en el contenido del asfalto, granulometrías cerradas del agregado y mezclas bien compactas e impermeables. Una de las razones para aumentar la cantidad de asfalto es que la película que cubre las partículas de agregado resulte de mayor espesor. Las películas más gruesas son más resistentes a endurecerse por envejecimiento. Ésto implica que se requiere mayor tiempo para reducir una película de asfalto más gruesa a igual grado de fragilidad que una película fina. Otro argumento favorable es que el aumento en la cantidad de asfalto reduce el tamaño de los poros de los vacíos

interconectados, o los sella haciendo más difícil la entrada del agua o aire en el interior de la mezcla.

Para resistir la acción del agua se aplican los mismos requerimientos; granulometría cerrada del agregado, altos contenidos de asfalto y compactación adecuada. Es conveniente usar agregados que retengan la cubierta de asfalto en presencia del agua. Si la mezcla es cerrada, el desplazamiento del asfalto por el agua generalmente no ocurre.

Se debe proveer suficiente asfalto a la mezcla para darle propiedades ligantes adecuados para resistir las fuerzas de tracción y abrasivas del tráfico. Un porcentaje de asfalto insuficiente puede provocar su desalajo de la superficie del agregado. Esto se conoce con el nombre de descubrimiento o desprendimiento. La abrasión puede tener lugar además si el asfalto ha comenzado a ponerse frágil. Un sobrecalentamiento del asfalto en las mezclas en caliente es causa de una posterior fragilidad, facilitando la abrasión del pavimento por el tránsito.

Una mezcla que tiene un alto contenido de asfalto con vacíos ocupados completamente ocupados con el mismo, puede proveer una mayor durabilidad; sin embargo, ésto podría no ser conveniente desde el punto de vista de la estabilidad. Cuando el material se coloca en el camino, puede ahuellarse o fluir bajo tránsito. También puede tener lugar el afloramiento o exudación del asfalto a la superficie.

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

2.3.3.5. Flexibilidad

Capacidad de una mezcla asfáltica de adaptarse a asentamientos graduales y movimientos en la base y la subrasante. Los asentamientos diferenciales en el relleno de un terraplén ocurren ocasionalmente. Es casi imposible desarrollar una densidad uniforme en la subrasante durante su construcción porque las secciones o porciones de pavimento tienden a comprimirse y asentarse bajo tránsito. Por esta razón un pavimento asfáltico debe tener la capacidad de adaptarse a asentamientos localizados o diferenciales sin quebrarse. Generalmente la flexibilidad de una mezcla asfáltica se incrementa con altos contenidos de asfalto y agregados de granulometría relativamente abierta.

2.3.3.6. Resistencia al deslizamiento

Capacidad de la superficie del pavimento asfáltico, de ofrecer resistencia al resbalamiento o deslizamiento, especialmente cuando está húmeda. Los factores para la obtención de alta resistencia al deslizamiento, son generalmente los mismos con los que se obtiene una alta estabilidad. Los principales contribuyentes son: adecuados contenidos de asfalto y agregados contextura superficial rugosa. Sin embargo, el agregado no solamente debe tener una superficie rugosa, sino que también debe ser resistente al pulimiento. Los agregados que contienen minerales que no son pulimentables, bajo diferentes condiciones de uso o abrasión, proveen una renovación continua de la textura del pavimento, manteniendo una superficie resistente al deslizamiento.

Las mezclas tan ricas en asfalto como para llenar los vacíos del pavimento compactado, causarán el afloramiento del mismo a la superficie. Ésto es lo que normalmente se llama exudación. El asfalto libre en la superficie del pavimento puede dar condiciones resbaladizas cuando el pavimento está húmedo.

2.3.3.7. Impermeabilidad

Resistencia que tiene un pavimento asfáltico al pasaje de agua y aire dentro o a través del mismo. Ya que el contenido de vacíos puede ser un índice de la susceptibilidad de una mezcla compactada, al pasaje de aire o agua es de mucha importancia la interconexión de vacíos y su comunicación con la superficie. La impermeabilidad al aire y agua es extremadamente importante desde el punto de vista de la durabilidad de las mezclas asfálticas.

2.3.3.8. Trabajabilidad

Facilidad con que las mezclas para pavimentación pueden ser colocadas y compactadas. Si se pone especial cuidado en un diseño apropiado y se coloca con una máquina distribuidora, la trabajabilidad no será un problema.

Algunas veces, las propiedades de los agregados aseguran estabilidad alta, hacen que las mezclas asfálticas que contienen dichos agregados sean difíciles de distribuir o compactar.

Como los problemas de trabajabilidad se descubren con mayor frecuencia durante operaciones de pavimentación, los ajustes en el diseño de la mezcla deben ser realizados rápidamente para permitir la prosecución del trabajo tan eficientemente como sea posible.

2.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.4.1. La Naturaleza del Cemento Asfáltico

Debido a la susceptibilidad térmica del asfalto es un factor que influye notablemente en el comportamiento de la mezcla.

Las mezclas asfálticas, elaborados con asfaltos rígidos son menos propicios a las variaciones de temperatura y velocidad de aplicación de la carga y, en consecuencia, tienen mayor vida a la fatiga.

Los asfaltos blandos hacen que las mezclas asfálticas sean más susceptibles a las variaciones de temperatura y velocidad de aplicación de la carga y, en consecuencia, más propensas a la deformación permanente.

El contenido de asfalto es el parámetro que más influye en el comportamiento de las mezclas asfálticas.

Para valores de porcentajes de asfalto por debajo del óptimo, la resistencia mecánica y la resistencia a la fatiga aumentan con el incremento del contenido de asfalto.

Para valores de porcentajes de asfalto por encima del óptimo, se presenta una disminución de las características mecánicas de la mezcla, incluso con aumento del riesgo a sufrir deformación permanente.

2.4.2. Granulometría

Tomando en cuenta la granulometría, aunque la influencia del tamaño máximo del agregado no sea tan notable como el contenido de asfalto, la curva granulométrica puede influir a través de dos factores: el tamaño máximo del agregado y el tipo de curva, que puede ser continua o discontinua.

Estos dos factores tienen influencia en el porcentaje de vacíos y, por ende, sobre la resistencia a la fatiga y la deformación permanente.

2.4.3. Textura y Forma de los Agregados

La textura y forma del agregado son factores que también afectan la compacidad. Los agregados angulosos, con superficies rugosas, son frecuentemente más difíciles de compactar, lo que lleva a un menor volumen de vacíos para una misma energía de compactación, y en consecuencia un módulo de rigidez más bajo.

Para una misma energía de compactación y una misma granulometría, las mezclas asfálticas constituidas por agregados redondeados y lisos presentan mayor porcentaje de vacíos y son fáciles de compactar, mientras que las mezclas con agregados triturados resultan con menor porcentaje de vacíos.

Para una misma compactación, parece no haber diferencias significativas en la duración de la vida a la fatiga entre mezclas con agregados redondeados y lisos, y mezclas con agregados triturados.

La incorporación de finos en las curvas granulométricas reduce el porcentaje de vacíos, con lo que el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica aumenta.

El porcentaje de vacíos del agregado mineral varía en función de la curva granulométrica. Para una curva más cercana a la línea de potencia 0.45 (curva de máxima densidad, llamada de Fuller), el porcentaje de vacíos es más bajo y la compactación más fuerte.

2.5. MATERIALES ASFÁLTICOS

Los materiales asfálticos son uno de los materiales más usados por el hombre para la construcción, este material tiene múltiples aplicaciones, desde en la agricultura hasta en la industria; su uso en la pavimentación es uno de los más importantes y antiguos, en la mayoría de los países las vías son pavimentadas con revestimientos asfálticos.

Existen varias razones por las cuales el asfalto es de uso intensivo en la pavimentación, siendo la principal: proporciona fuerte unión de los agregados, actuando como un ligante que permite flexibilidad controlable, es impermeable, es durable y resistente a la mayoría de los ácidos y sales alcalis, pudiendo ser utilizado calentado o emulsionado, en ambas combinaciones de esqueleto mineral, con o sin aditivos.

Las siguientes definiciones o conceptos son empleados con referencia al material asfáltico:

- Betún: Comúnmente definido como una mezcla de hidrocarburos solubles en disulfuro de carbono.
- Asfalto: Mezcla de hidrocarburos derivados de petróleo de forma natural o por destilación, cuyo principal componente es el betún, pudiendo contener otros materiales como oxígeno, nitrógeno de azufre, en pequeñas proporciones.
- Alquitrán: Es una designación genérica de un producto que contiene hidrocarburos, que se obtienen de destilación destructiva de carbón, madera, etc.

Por lo tanto, los asfaltos y el alquitrán son materiales bituminosos porque contienen betún, más no puede ser confundido porque sus propiedades son bastante diferentes.

El alquitrán prácticamente ya no es utilizado más en la pavimentación desde que se descubrió su alto poder cancerígeno además de su poca homogeneidad y bajas cualidades de ligante para pavimentación, derivado de su propia forma de obtención.

Con respecto a terminología los europeos usan el término betún al ligante obtenido del petróleo, en cuanto a los americanos estos suelen llamarlo asfalto.

Los asfaltos son el resultado directo de la destilación del petróleo crudo, ya sea esta realizada natural o industrialmente, el cual tiene propiedades de ser un adhesivo termo-visco-elasto-plástico, impermeable y poco reactivo al agua. Siendo susceptible a velocidad, intensidades de carga, temperaturas de servicio.

La característica de termo-visco-elasto-plástico de este material se manifiesta en su comportamiento mecánico,

El asfalto natural se forma cuando el crudo sube a la superficie terrestre a través de grietas. La acción del sol y del viento separa aceites ligeros y los gases, dejando un residuo negro y plástico, que es el asfalto natural. La mayor parte de los asfaltos naturales están impregnados con un alto porcentaje de arcilla o de arena, muy fina, recogidas durante el viaje del crudo hacia la superficie terrestre.

Los asfaltos del petróleo son los más empleados y se obtienen por destilación del crudo que puede ser por vapor o por aire.

Los asfaltos de petróleo pueden tener base asfáltica o base parafínica. Los de base asfáltica son los que poseen mejores características para su empleo en pavimentación por sus propiedades ligantes y de resistencia a la meteorización.

Las de base parafínica se oxidan paulatinamente al exponerse al aire, dejando un producto pulverulento, sin poder ligante.

El tipo de base que posea un asfalto depende exclusivamente de; las características del crudo del cual proviene.

El asfalto se usa en pavimentación para unir entre sí las partículas de agregado y protegerlas de la humedad.

2.5.1. Composición Química de los Materiales Asfálticos

Los materiales provenientes del petróleo tienen diferentes propiedades físicas y químicas, variando de líquidos negros viscosos a líquidos castaños bastante fluidos, con una composición química predominante en parafina.

Al analizar los elementos de los asfaltos se pudo presenciar que tiene la siguiente proporciones de componentes químicos: Carbono 82 a 88%; Hidrogeno de 8 a 11%; Azufre de 0 a 6%; Oxígeno de 0 a 1.5% y Nitrógeno de 0 a 1%.

La composición varía de acuerdo a la fuente de petróleo, con las modificaciones inducidas para el proceso de refinación y durante el proceso de envejecimiento de su puesta en servicio.

2.5.2. Cementos Asfálticos Convencionales

El cemento asfáltico es un ligante denso que a la temperatura ambiente es semisólido, usualmente pegajoso y de color variables entre un café muy oscuro y negro.

Los cementos asfálticos se obtienen por destilación al vapor de los residuos más pesados del proceso de fraccionamiento, continuándose la destilación hasta obtener la consistencia deseada. Se aplica el vapor en el refinado para que los volátiles pesados puedan ser separados sin aumentar demasiado la temperatura, ya que temperaturas

excesivamente altas reducen la ductilidad, aumentan la fragilidad y producen desdoblamiento, dando lugar a un producto menos homogéneo.

Tabla 1.8.1 Asignaciones que se dan a Algunos Cementos Asfálticos

AC 40/50	Cemento Asfáltico con penetración entre 40 y 50 décimas de milímetro.
AC 60/70	Cemento Asfáltico con penetración entre 60 y 70 décimas de milímetro.
AC 85/100	Cemento Asfáltico con penetración entre 85 y 100 décimas de milímetro.
AC 120/150	Cemento Asfáltico con penetración entre 120 y 150 décimas de milímetro.
AC 200/300	Cemento Asfáltico con penetración entre 200 y 300 décimas de milímetro.

La calidad de un cemento asfáltico viene afectada por la propiedad del crudo, que pueden variar mucho aún dentro de un mismo yacimiento y también por el sistema de refinación que se haya empleado.

El cemento asfáltico convencional es el AC 85/100, es el cemento asfáltico más conveniente para pavimentación.

2.5.3. Asfaltos Modificados

Para la mayoría de las aplicaciones viales, los asfaltos convencionales tenían buen comportamiento, satisfaciendo plenamente los requisitos necesarios para un desempeño adecuado de las mezclas asfálticas frente a las condiciones de tráfico y clima. Pero el constante aumento de las solicitudes debidas al mayor número de cargas por eje, a la mayor presión de inflado, a las mayores cargas por eje, a las mayores velocidades, donde existen cambios extremos de temperaturas térmicas; se hace necesario el uso de modificadores de propiedades reológicas y mecánicas de los asfaltos.

La modificación de asfalto con la incorporación de polímeros da por resultado ligantes con extraordinarias características de elasticidad, adherencia y cohesión a un costo competitivo.

*Mano*⁷, presenta las siguientes definiciones de polímeros y macromoléculas:

- Las macromoléculas son moléculas gigantescas que resultan del encadenar de diez mil o más átomos de carbono, unidos por enlaces covalentes pudiendo ser éstos naturales (madera, caucho, asfalto) o sintéticos (plásticos, adhesivos, etc.).
- Los polímeros son macromoléculas sintéticas, estructuralmente simples, constituidas de unidades estructurales repetidas en su larga cadena, denominadas monómeros. Los homopolímeros son constituídos por apenas un monómero, y los copolímeros son los que presentan por lo menos dos monómeros en su estructura.

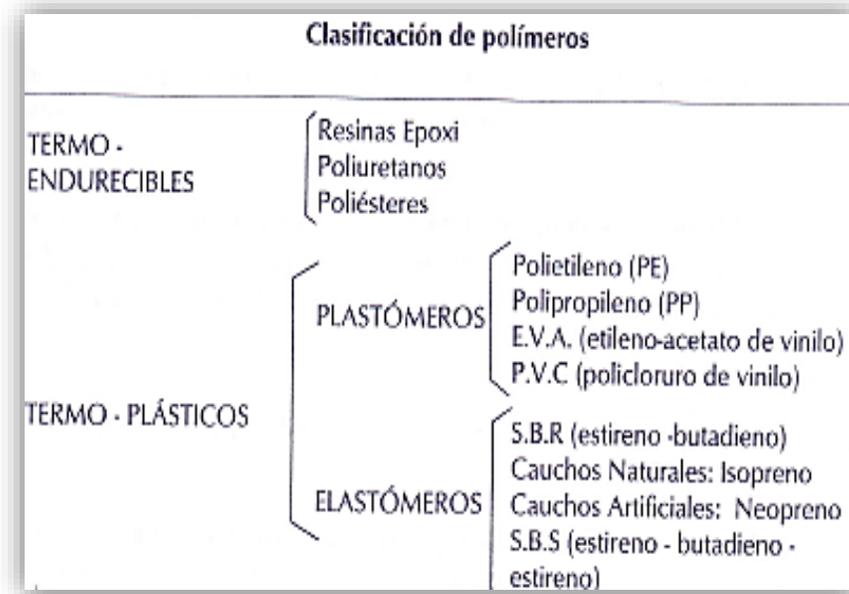
El comportamiento de un polímero sintético depende de los materiales de partida (monómeros), del tipo de reacción empleado para su obtención y de la técnica de preparación.

Las reacciones empleadas son:

- Poliadicción: por ejemplo, SBR (caucho estireno - butadieno) y EVA (etileno – acetato de vinilo).
- Policondensación.
- Modificación química de polímero.

⁷ Introducción a polímeros. Sao Paulo, editora: Edgard blUucher, 1991.

Tabla 1.8.2 Clasificación de Polímeros⁸



En cuanto a su comportamiento frente a las variaciones térmicas, los polímeros son clasificados en categorías como sugerido por MANO (1985,1991) y LEITE⁹(1999):

- Termorígidos: son aquellos que no se funden, sufren degradación a una temperatura límite y endurecen irreversiblemente cuando han alcanzado una temperatura que dependen de su estructura química. Presentan cadenas moleculares que forman una red tridimensional que resiste cualquier movilidad térmica; ejemplo: resina epoxi, poliéster, poliuretano.
- Termoplásticos: son aquellos que se funden hasta convertirse maleable reversible cuando se calienta. Normalmente consiste en cadenas lineales, pudiendo ser también ramificadas. Son incorporados a los asfaltos a alta temperatura; por ejemplo: polietileno, polipropileno, PVC.

⁸ FUENTE: Ingeniería de Pavimentos.

⁹ Estudios de preparación y Caracterización de Asfaltos Modificados por Polímeros, Rio de Janeiro, 1999.

- Elastómeros: son aquellos, que cuando se calientan, se descomponen antes de ablandarse, con propiedades elásticas; por ejemplo: SBR.
- Elastómeros termoplásticos: son aquellos, que a bajas temperaturas presentan comportamiento elástico, pero cuando la temperatura aumenta pasan a presentar comportamiento termoplástico; por ejemplo: SBS y EVA.

No todos los polímeros son susceptibles a ser adicionados a los asfaltos, los asfaltos modificados con polímeros presentan estabilidad en el almacenamiento. La cantidad de polímero que debe ser adicionado al ligante es variable y depende de las propiedades finales deseadas. Es necesario también verificar la adecuada dispersión del polímero, de forma que la matriz polimérica quede fijada en la estructura del asfalto, ocluido en la misma malla.

Los asfaltos modificados por polímeros se ha evidenciado que son los que han logrado alargar la vida de servicio de los pavimentos.

Como un asfalto es un material termo-visco-elástico, son características que van a influenciar directamente en el desempeño de las mezclas asfálticas, tanto de deformación permanente en cuanto a fatiga. Las deformaciones resultantes de las cargas aplicadas, así, las respuestas de la mezcla asfáltica a los pulsos de carga generados por el tráfico en movimiento pueden ser modificadas por la presencia de polímeros en el ligante, aumentando o disminuyendo las parcelas de viscosidades y de elasticidades en conjunto, para varias pistas de temperatura.

Los polímeros termoplásticos normalmente usados en los asfaltos modificados consisten en copolímeros de estireno-butadieno (SB), estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno-butadieno-estireno (SEBS), acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), acetato de vinilo (EVA).

2.5.3.1. Objetivo de la modificación de los asfaltos

Los modificadores le permiten al diseñador intervenir sobre las características mecánicas del asfalto. Entre otras, se pueden mencionar la reducción de la

susceptibilidad térmica, en la búsqueda de unas características reológicas constantes, especialmente a elevadas temperaturas de servicio. En consecuencia, ello implica modificar las propiedades de las mezclas, en el sentido de disminuir tanto la deformación plástica a altas temperaturas, como la rigidez a baja temperatura, ofreciendo un mejor comportamiento en servicio ante la acción de las cargas circulantes más pesadas del tránsito, independientemente de las condiciones climáticas imperantes.

2.5.3.2. Beneficios que se buscan con la modificación del asfalto

Los principales beneficios que se persiguen con la modificación del asfalto:

- ✓ Aumentar la rigidez a altas temperaturas de servicio, mejorando la resistencia de las mezclas a la deformación permanente.
- ✓ Reducir la rigidez a bajas temperaturas, previniendo la fisuración térmica.
- ✓ Aumentar la resistencia a fatiga de las mezclas.
- ✓ Mejorar la adhesión con los agregados pétreos.
- ✓ Mejorar la cohesión, brindando mejor retención de los agregados en la vida inicial de los tratamientos superficiales.
- ✓ Reducir el endurecimiento en servicio, brindando una vida superior a la mezcla, debido a la retención de sus ventajas iniciales.
- ✓ Disminuir la susceptibilidad térmica en el rango de temperatura de servicio.
- ✓ Aumentar la viscosidad a bajas velocidades de corte, permitiendo mejores espesores de películas en el agregado de las mezclas abiertas y reduciendo la exudación en tratamientos superficiales.

Existen una variedad de aditivos que pueden ser exitosos en la mejora de cuando menos una de las propiedades del asfalto, pero, es necesario tener en cuenta que no existe un aditivo que mejore todas las propiedades antes descritas.

2.6. AGREGADOS MINERALES

Todos los revestimientos asfálticos constituyen de la asociación de ligantes asfálticos de agregados, en algunos casos, de productos complementarios. Esas asociaciones cuando están ejecutadas y aplicadas apropiadamente, deben originar estructuras durables en su vida de servicio. Para que eso ocurra, se deben seleccionar las propiedades que los agregados deben contener.

La cantidad de agregado mineral en las mezclas asfálticas para pavimentación es generalmente del 90 a 95 % en peso y del 75 a 85 % en volumen. Los agregados minerales son los principales responsables de la capacidad de carga del pavimento. Además el agregado influye notablemente en el comportamiento del pavimento.

Los agregados minerales han sido definidos:

“Como cualquier material inerte y duro con partículas o fragmentos graduados usados en las mezclas. Ello incluye arena, grava, piedra partida escoria, desechos o polvos de rocas”, MANUAL DEL ASFALTO¹⁰.

“Material granular de composición mineral tal como la arena, ripio, conchilla, escoria, o piedra partida, usado con un medio cementante para formar morteros o concretos o solo capas de bases, balastos de ferrocarriles, etc.”.,ASTM¹¹ D8.

2.6.1. Clasificación de las Rocas

Las rocas son agregados naturales (sistemas homogéneos) que se presentan en nuestro planeta en masas de grandes dimensiones. Están formadas por la asociación de uno o más minerales que pueden formarse por cristalización o por transformaciones en estado sólido.

Éstas se clasifican en:

¹⁰ Traducido por la comisión permanente del asfalto de la República Argentina.

¹¹ American Society for Testing and Materials.

- Rocas ígneas: formadas a partir del enfriamiento de rocas fundidas (magmas). Son rocas cristalinas, los magmas pueden enfriarse de manera rápida en la superficie de la tierra mediante la actividad volcánica o cristalizar lentamente en el interior, originando grandes masas de rocas llamadas plutónicas. Cuando se cristalizan en grietas, la corteza forman las rocas ígneas filonianas.
- Rocas sedimentarias: son las originadas a partir de la consolidación de fragmentos de otras rocas, de restos de plantas y animales o de precipitados químicos.
- Rocas metamórficas: son aquellas que sometidas a intensas presiones y temperaturas sufren cambios en sus minerales y se transforma en un nuevo tipo de roca. Es decir son rocas recristalizadas.

2.6.2. Fuentes de Agregados

Los agregados para pavimentación asfáltica son generalmente clasificados de acuerdo a la fuente o medios de obtención:

- Agregados procedentes de las minas o de canteras: las rocas expuestas son desgastadas y degradadas por muchos procesos de la naturaleza tanto físicos como químicos. Los productos de los procesos de la degradación son generalmente transportados por el viento, agua y hielos deslizantes y depositados como material del suelo en diversas formas.
Los agentes naturales de transporte influyen además en la forma de las partículas.
- Agregados procesados: incluyen al ripio natural o rocas que han sido trituradas y tamizadas.
- Agregados sintéticos o artificiales: son los agregados resultantes de la modificación o cambios tanto físicos como químicos de algunos materiales. Éstos pueden tomar la forma de subproductos, como los obtenidos en refinamiento de minerales, o ser especialmente producidos o procesados a partir de materiales en crudo, para ser usados finalmente como agregados. Las

escorias de altos hornos son los agregados artificiales más comúnmente usados, son subproducto de la fusión del mineral de hierro en altos hornos. Estos materiales por lo común son livianos y tienen una resistencia extraordinaria al desgaste. Frecuentemente son preferidos en la pavimentación de las cubiertas de puentes y en las capas superficiales de pavimentos asfálticos donde se requiere un alto grado de resistencia al deslizamiento.

2.7. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

El diseño de mezclas asfálticas para pavimentación, como cualquier diseño de ingeniería de materiales, es cuestión de selección y proporciones de materiales para obtener cualidades y propiedades deseadas una vez finalizada la construcción. El objetivo general es una mezcla y graduación de agregados económicos (dentro de las exigencias de las especificaciones) y un contenido de asfalto adecuado que produzca una mezcla que posea:

- 1) Asfalto suficiente para asegurar un pavimento durable a través del total recubrimiento de las partículas del agregado e impermeabilización y trabazón de las mismas bajo una adecuada compactación.
- 2) Estabilidad suficiente de la mezcla para satisfacer los requerimientos de servicio y demandas de tráfico sin deformación o desplazamientos.
- 3) Cantidad de vacíos en la mezcla total compactada suficiente para evitar el afloramiento, la exudación y la pérdida de estabilidad.
- 4) Adecuada trabajabilidad para permitir una operación de construcción eficiente en la colocación de la mezcla para pavimentación.

2.7.1. Método MARSHALL de Diseño de Mezclas

Los conceptos básicos del método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas fueron formulados por Bruce Marshall, experto ingeniero en Asfaltos, junto con el Mississippi State Highway Department. El U.S. Corps of Engineers, a través de extensas investigaciones y estudios correlacionados, mejoró e incorporó ciertos

aspectos a su procedimiento de ensayo desarrollándose finalmente un criterio de diseño de mezclas. Este ensayo fue normalizado por ASTM D1559.

El método Marshall es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que utilizan cemento asfáltico y agregados de granulometría cerrada o fina, con un tamaño máximo nominal de 25mm. (1") o menor. Se puede usar tanto para diseño de laboratorio como para el control de la mezcla durante la pavimentación. Los aspectos principales del ensayo son el análisis densidad-vacíos y el ensayo de estabilidad-fluencia, en muestras de mezclas asfálticas compactadas.

2.7.1.1. Esquema del método

Antes de la preparación de las muestras de ensayo se requiere:

- a) Que los materiales cumplan con las especificaciones del proyecto.
- b) Que la combinación de agregados cumpla con las exigencias de granulometría de las especificaciones del proyecto.
- c) Que los pesos específicos de todos los materiales usados en el diseño de la mezcla sean conocidos o determinados.

En el método Marshall se usan probetas compactadas normalizadas de 102mm (4") de diámetro y 64mm (2 ½") de altura. Se preparan usando un procedimiento establecido. Se determinan los pesos de las probetas compactadas antes de efectuar los ensayos.

Estas determinaciones son necesarias el peso específico bruto y los cálculos posteriores.

La estabilidad de la probeta de ensayo es la máxima resistencia a las cargas, en Newton (Libras)

Desarrollada a 60°C (140°F). El valor de fluencia es el movimiento total, o deformación, en unidades de 0.25mm (0.01") que sufre la probeta durante el ensayo, desde el momento en que empieza a ser cargada hasta alcanzar la carga máxima.

Se determina la densidad y vacíos para cada probeta y cuando los valores de todas las probetas han sido calculados, se selecciona un contenido de asfalto para el diseño, y los datos obtenidos sirven de guía para ensayos adicionales.

2.7.1.2. Diseño MARSHALL (AASHTO T245)

Los agregados y asfaltos presentan diferentes características, las cuales tienen un impacto directo sobre la naturaleza misma del pavimento. El primer paso en el método de diseño, entonces, es determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, etc.) que debe tener la mezcla de pavimentación, y seleccionar un tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades.

Una vez efectuado lo anterior, se procede con la preparación de los ensayos.

- Número de muestras: para la determinación óptima de asfalto, este debe ser primeramente estimado. Se destinan una serie de muestras de prueba para distintos rangos de contenidos de asfalto que se incrementa de 0.5%.
- Preparación de los agregados: los agregados son secados hasta peso constante de 105°C a 110°C. se recomiendan las fracciones: 25.4 a 19.0 mm (1" a ¾"), 19.0 a 9.5 mm (¾" a 3/8"), 9.5 a 4.75 mm (3/8" a N°4), 4.75 a 2.36 mm (N°4 a N°8) y pasando 2.36 mm (N°8).
- Temperatura de mezclado y compactación: Las temperaturas seleccionadas para el mezclado y la compactación, deben ser las que permiten una viscosidad de mezclado de 170±20 centistokes y viscosidad de compactación de 280 ±30 centistokes.
- Preparación del molde y el pisón de compactación:
 - El asfalto y el agregado se calientan y mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas. Ésto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.

- Las mezclas asfálticas calientes se colocan en moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, el cual también es calentado para que no enfrié la superficie de mezcla al golpearla.
- Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes (35,50 o75) depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada.

2.7.1.3. Ensayos de estabilidad y fluencia

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

La fluencia es leída cuando la briketa asfáltica ha alcanzado su máxima deformación aplicando una carga que comprime la muestra hasta que llega a su colpaso.



Figura 1.8.3 Ensayo de fluencia y estabilidad a briketa¹²

¹² FUENTE: construccióncivil.com

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

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

2.7.1.3.1. Valor de estabilidad Marshall

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

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

Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de la durabilidad.

2.7.1.3.2. Valor de fluencia Marshall

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

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio.

Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas, y tienen tendencia a deformarse facialmente bajo las cargas del tránsito.

Existen casos donde no es posible o práctico, por razones económicas u otras, cumplir con las exigencias del criterio de diseño. En tales casos puede permitirse una tolerancia del 1% en los vacíos. El valor de fluencia sin embargo, nunca debe ser excedido, y el de estabilidad nunca debe estar por debajo del requerido.

2.7.1.4. Análisis de densidad y vacíos

Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de probetas.

El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

Cuando las muestras están perfectamente compactadas, las capas de rodadura con áridos de granulometría densa no deben contener más del 5% ni menos del 3% de Huecos, el límite superior asegura la impermeabilidad del pavimento y el inferior garantiza la estabilidad del pavimento y ausencia de exudaciones

2.7.2. CRITERIO DE DISEÑO MARSHALL

Tabla 1.8.3 *Criterios de Diseño Marshall*¹³

CRITERIO DE DISEÑO MARSHALL	TRÁNSITO LIVIANO		TRÁNSITO MEDIO		TRÁNSITO PESADO	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
COMPACTACIÓN Nº DE GOLPES POR CARA	35		50		75	
ESTABILIDAD NEWTONS	2224		3336		6672	
ESTABILIDAD LIBRAS	500		750		1500	
FLUENCIA 0,25 mm (0,01")	8	20	8	18	8	16
VACIOS (%)	3	5	3	5	3	5

Tabla 1.8.4 *Porcentajes Mínimos de Vacíos del Agregado Mineral*¹⁴

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DE LA PARTÍCULA		VOLUMEN MÍNIMO DE VACIOS AGREGADO MINERAL
mm	Plg.	
1,18	0,05	23,5
2,36	0,09	21
4,75	0,19	18
9,50	0,38	16
12,50	0,50	15
19,00	0,75	14
25,00	1,00	13
37,50	1,50	12
50,00	2,00	11,5
63,00	2,50	11

2.8. ESTUDIO DE LOS AGREGADOS

2.8.1. Toma de Muestras (ASTM C75 - AASHTO T2)

Los ensayos y el muestreo son dos de las funciones más importantes en el control del agregado mineral. Los datos extraídos de estos ensayos son las herramientas de

¹³ FUENTE: Tecnología de Asfalto, 2da. Edición 1983.

¹⁴ FUENTE: Tecnología de Asfalto, 2da. Edición 1983.

control de calidad del producto. Por esta razón se debe tener mucho cuidado en seguir estrictamente los procedimientos de muestreo y ensayos.



Figura 1.8.4 Extracción de Muestras¹⁵

- ❑ Muestra de yacimiento: muestra representativa de áridos en su sitio de depósito natural, no sometido a tratamiento alguno.
- ❑ Muestra de producción: muestra representativa de un árido removido de su depósito natural y sometido a cualquier tratamiento con trituración, lavado o clasificación y que se encuentra sobre cintas transportadoras, o almacenado junto al lugar de extracción de tratamiento.
- ❑ Muestra de obra: muestra representativa de un árido que se encuentra en una obra ya sea sobre vehículos o almacenado.
- ❑ Muestra gemela: conjunto de dos o más fracciones de muestra, separadas por cuarteo. Dichas muestras pueden emplearse para verificar el efecto de los procedimientos de ensayo en la dispersión de resultados.

¹⁵ FUENTE: Elaboración Propia

2.8.2. Cuarteo de Agregados (ASTM C702 - AASHTO T248)

El cuarteo de agregados tiene por objeto homogeneizar el agregado y mantener la representatividad de la misma.

- ❑ Cuarteo Mecánico: Consiste en una especie de cajón metálico con ranuras en su parte superior y separados entre sí; estas descienden en forma de canal hacia los lados del cajón y están diseñadas de un modo alternado, o sea, una primera ranura o canal descarga el material por un lado y la siguiente al lado contrario y así sucesivamente hasta el total de ellas.



Figura 1.8.5 Cuarteo Mecánico de Materiales¹⁶

- ❑ Cuarteo Manual: La muestra debe estar húmeda para evitar la segregación del material fino de las partículas gruesas. Se junta todo el material mezclado y disperso dándole forma circular, se divide el material en cuatro sectores iguales. Se elimina los sectores opuestos, quedando el peso del material reducido a la mitad. Los dos sectores restantes se vuelven a mezclar como se explicó con anterioridad, y volverán a repetirse los pasos hasta que quede la cantidad necesaria que alcance para los distintos ensayos.

¹⁶ FUENTE: Elaboración Propio.



Figura 1.8.6 Cuarteo de Muestras Manualmente¹⁷

2.8.3. Análisis Granulométrico (ASTM E40 -AASHTO T27-99)

Distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido.

La muestra de árido es pasada por una serie de mallas con aberturas que se hacen progresivamente más pequeñas y se pesa el material retenido por cada malla.

Tabla 1.8.5 Serie de Tamices según su Abertura¹⁸

DESIGNACION DEL TAMIZ	ABERTURA DEL TAMIZ
1 1/2 in.	38,1 mm.
1 in.	25,00 mm.
3/4 in.	19,0 mm.
1/2 in.	12,5 mm.
3/8 in.	9,5 mm.
N°4	4,75 mm.
N°8	2,36 mm.
N°10	2,0 mm.
N°16	1,18 mm.
N°30	0,6 mm.
N°50	0,3 mm.
N°100	0,15 mm.
N°200	0,075 mm.

¹⁷ FUENTE: Elaboración Propia

¹⁸ FUENTE: Tecnología del Asfalto, 2da Edición 1983.

Las especificaciones sobre la granulometría del agregado han sido desarrolladas a raíz de la necesidad de:

- ✓ Controlar los materiales de construcción y obtener posteriormente un pavimento conveniente y de calidad.
- ✓ Utilización óptima de materiales locales disponibles.
- ✓ Reducir costos a través de la normalización de tamaños.



Figura 1.8.7 Granulometría de Agregados Pétreos¹⁹

2.8.4. Peso Específico de los Agregados (ASTM E127 - AASHTO T85-91 y ASTM E128 - AASHTO T84-00)

El peso específico de un agregado es el cociente entre el peso de un volumen unitario de material y el peso de igual volumen de agua a temperatura entre 20 y 25 °C (68 y 77 °F).

- ❑ Peso específico aparente, considera al volumen del agregado como el volumen total excluyendo el volumen de poros o capilares que pueden llenarse de agua en 24 horas de saturación.

¹⁹ FUENTE: Elaboración Propia.

- ❑ Peso específico bruto, considera el volumen total de las partículas del agregado, incluyendo los poros que pueden ser llenados con agua en 24 horas de saturación.
- ❑ Peso específico efectivo, considera el volumen total del agregado excluyendo al volumen de los poros que absorbe asfalto.
- ❑ Absorción del agua, porcentaje de agua absorbida por el agregado seco.
- ❑ Peso específico saturado y sin humedad superficial, incluyendo en el volumen los poros accesibles y los no accesibles.



Figura 1.8.8 Ensayo de Peso Específico en Agregados pétreos²⁰

2.8.5. Peso Unitario (ASTM C29)

Es la relación entre el peso de un material y el volumen ocupado por el mismo, expresado en Kg/m³ y se utiliza para materiales granulares.

- ❑ Peso unitario compactado, se usara invariablemente para la conversión de peso a volumen; para conocer el consumo de agregados por m³ de concreto.
- ❑ Peso unitario compactado, este valor se usara para el conocimiento de volúmenes de materiales apilados y que están sujetos a acomodamientos o asentamientos provocados por el transito sobre ellos o por la acción del tiempo. Algunas veces se

²⁰ Fuente: Elaboración Propia

usa el peso volumétrico como indicación de su calidad especialmente del agregado de escoria triturada; los materiales más pesados son más fuertes estructuralmente que los ligeros.



Figura 1.8.9 Determinación del Peso Unitario en Agregados Finos y Gruesos²¹

2.8.6. Abrasión (ASTM E131 -AASHTO T96-99)

Durante el proceso de obtención de las mezclas asfálticas éstas están sujetas a abrasión, la cual también ocurre durante el tiempo de tráfico por lo que los agregados deben presentar habilidad para resistir las desintegraciones.

A través de una carga abrasiva se pretende determinar la resistencia de los áridos gruesos a la trituración, debido a que los agregados localizados próximos a la

²¹ FUENTE: Elaboración Propia

superficie de pavimento deben presentar resistencia a la abrasión mayor a los que se encuentran en las capas inferiores.



Figura 1.8.10 Equipo Utilizado en Ensayo de Desgaste de los Ángeles²²

2.8.7. Porcentaje de Caras Fracturadas (ASTM-D5821)



Figura 1.8.11 Análisis de Caras Fracturadas²³

El porcentaje de caras fracturadas para las mezclas asfálticas es importante, ya que éste tiene incidencia directa en la adhesividad que pueda presentar la mezcla ligante – agregado.

²² FUENTE: Elaboración Propia

²³ FUENTE: Elaboración Propia

2.8.8. Ensayo de Durabilidad (ASTM E88 AASHTO T109-99)



Figura 1.8.12 Muestras en Sulfato de Sodio²⁴

Determinar la calidad de los agregados que han de estar sometidos a la acción de agentes atmosféricos, para ello se hace uso de una solución de sulfato de sodio o de magnesio, a través de la cual se pretende analizar la desintegración de los agregados.

2.8.9. Equivalente de Arena (ASTM D2419 AASHTO T176-00)

Establecer las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por el tamiz de 4.75 mm (N°4).

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



Figura 1.8.13 Ensayo de Equivalente de Arena²⁵

²⁴ FUENTE: Elaboración Propia

2.9. CONTROL DE CALIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO

2.9.1. Muestreo (ASTM D140 AASHTO T40-78)

El muestreo es importante para controlar la calidad del cemento asfáltico.

- En el lugar de producción de materiales líquidos o licuados por calentamiento.
- Desde vagones tanques, camiones tanques, estanques de almacenamientos
- De barcos tanques o barcazas
- De líneas de cañerías durante la carga o descarga.
- De materiales líquidos en tambores o barriles.
- De materiales solidos o semisólidos sin chancar.
- De materiales chancados o pulverizados.



Figura 1.8.14 Planta Asfáltica²⁶

Tabla 1.8.6 Cantidades de Muestreo de Asfalto²⁷

TIPO DE ASFALTO	PROCEDENCIA	NUMERO DE MUESTRAS	CANTIDAD DE CADA MUESTRA	NIVEL DE EXTRACCION
CEMENTO ASFALTICO	CAMION TRANSPORTADOR	3	1 Kg	INICIO, MITAD ,Y TERMINO DEL VACIADO
	ESTANQUE DE ALMACENAMIENTO	3	1 Kg.	SUPERIOR, INTERMEDIO E INFERIOR
	BARRILES O TAMBORES	1/ UNIDAD SELECCIONADA	2 Kg.	NUCLEO

²⁵ FUENTE: Elaboración Propia

²⁶ FUENTE: Elaboración Propia

²⁷ FUENTE: Manual de Ensayos de Asfaltos – ABC.



Figura 1.8.15 Muestreo de Asfalto²⁸

2.9.2. Penetración (ASTM D5 - AASHTO T49-97)

Se lleva a cabo sobre cementos asfálticos y sobre los residuos de la destilación de asfaltos líquidos o emulsiones asfálticas y es una medida de la consistencia de los mismos. Sobre una pasta de asfalto previamente moldeada y calentada hasta una temperatura uniforme de 25°C, se coloca un agua de acero, que soporta un peso de 100 gramos y se deja caer libremente durante cinco segundos.



Figura 1.8.16 Ensayo de Penetración en Asfalto²⁹

²⁸ FUENTE: Elaboración Propia

²⁹ FUENTE: Elaboración Propia

2.9.3. Peso Específico (ASTM D71-94 - AASHTO T229-97)

También entendido como densidad o gravedad específica de un material, es la relación de su peso a una temperatura dada, el peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura. La gravedad específica de los asfaltos sólidos se determina por inmersión directa en agua y de los semisólidos, líquidos y emulsificados se encuentra por medio del picnómetro.



Figura 1.8.17 *Peso Específico Asfáltico*³⁰

2.9.4. Ductilidad (ASTM D113 - AASHTO T51-00)

Una propiedad que tienen los asfaltos es su gran capacidad de mantenerse coherentes bajo las grandes deformaciones inducidas por el tránsito. En el ensayo se mide la resistencia a la ruptura por medio del alargamiento de una probeta de cemento asfáltico, estirada en sus extremos a velocidad constante. Normalmente el ensayo se realiza a una temperatura de 25°C y a una velocidad de alargamiento de 5 cm/min.



Figura 1.8.18 *Ductilidad del Asfalto*³¹

³⁰ FUENTE: Elaboración Propia

2.9.5. Punto de Inflamación (ASTM D1310-01 - AASHTO T79-96)

Corresponde a la temperatura a la que el asfalto puede ser calentado con seguridad, sin peligro a que se inflame en presencia de una llama. Esta temperatura es más baja que la necesaria para que el material entre en combustión. Este ensayo da una indicación de la volatilidad de los materiales asfálticos y sirve para establecer temperaturas de calentamiento sin peligro de incendio.



Figura 1.8.19 Punto de Inflamación del Asfalto³²

2.9.6. Película Delgada (ASTM D2872 - AASHTO T240-06)

Es un procedimiento que trata de simular en el laboratorio las condiciones que producen un aumento de la consistencia del asfalto durante las operaciones de mezclado en la planta; por lo tanto, mide el endurecimiento o posible grado de “envejecimiento” del cemento asfáltico durante las operaciones de mezclado.

³¹ FUENTE: Elaboración Propia

³² FUENTE: Elaboración Propia



Figura 1.8.20 Ensayo de Película Delgada³³

2.9.7. Punto de Reblandecimiento (ASTM D36 AASHTO T53-96)

Los asfaltos son materiales termoplásticos, por lo cual no puede hablarse de un punto de fusión en el término estricto de la palabra. Se ha definido por conveniencia, un punto de ablandamiento convencional, determinado por la temperatura a la que alcanza un determinado estado de fluidez. La prueba más común para determinar el punto de ablandamiento de un cemento asfáltico es la denominada del anillo y bola.



Figura 1.8.21 Punto de Reblandecimiento Asfáltico³⁴

2.9.8. Recuperación Elástica (ASTM D6084-06AASHTO T301-99)

Éste se utiliza en los asfaltos modificados que comprenden los cementos y emulsiones asfálticas modificadas. El ensayo se efectúa a una temperatura de 13 ± 0.5 °C y a una velocidad de 5 cm/min.

³³ FUENTE: Elaboración Propia

³⁴ FUENTE: Elaboración Propia



Figura 1.8.22 Recuperación Elástica del Asfalto 60/85³⁵

2.10. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA COMPONENTES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.10.1. Para agregados pétreos

Tabla 1.8.7 Requisitos de los Agregados Pétreos para Mezclas Bituminosas³⁶

Requisitos de los Agregados Pétreos para Tratamientos y Mezclas Bituminosas							
Tipo de tratamiento o mezcla	Partículas fracturadas mecánicamente	Desgaste de los angeles	Perdidas en ensayo de solidez		Índices de Aplanamiento y Alargamiento	Equivalente de Arena	Contenido de Impurezas
			Sulfato de sodio	Sulfato de magnesio			
mezcla abierta en caliente	75% min	12% max.			35% max.	50% min	0,5% max
Mezcla densa en caliente agregado grueso agregado fino eradicación mezcla	75% min	35% max (BASE) 25% max (RODADURA)	12% max.	18% max.	30% max.	50% min	0,5% max
discontinua en caliente	75% min	25% max.	12% max.	18% max.	25% max.	50% min	0,5% max
mezcla drenante	75% min	25% max.					0,5% max

³⁵ FUENTE: Elaboración Propia

³⁶ FUENTE: Manual del asfalto

2.10.2. Para Asfaltos

Tabla 1.8.8 Especificaciones para Cementos Asfálticos³⁷

	GRADO DE PENETRACION DEL CEMENTO ASFALTICO									
	40/50		50/60		85/100		120/150		200/300	
SOBRE ASFALTO ORIGINAL	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
penetracion 25°C, 100gr., 5 seg., (0,1 mm)	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
punto de inflamacion Copa de cleveland(°C)	232	50	232		232		218		177	
ductilidad, 25°C, (5 cm/min) (cm)	100	50	100		100		100			
solubilidad en tricloroetileno (%)	99	50	99		99		99		99	
ensayo de la mancha										
nafta estandar	negativa para todos los grados									
nafta-xileno(%) xileno	negativa para todos los grados									
heptano-xileno (%) de xileno	negativa para todos los grados									
TFOT, 3,2 mm., 5hrs., 163°C	0,8		0,8		0,8		0,8		0,8	
perdida por calentamiento (%)	0,8		0,8		0,8		0,8		0,8	
SOBRE RESIDUO ASFALTICO										
penetracion (% del original)	58		54		50		46		40	
ductilidad, 25°C, (5 cm/min) (cm)			50		75		100		100	

2.11. CONTROL DE CALIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

2.11.1. Resistencia

Con un mínimo de dos probetas por lote de la mezcla elaborada, se moldearán probetas, para verificar en el laboratorio su resistencia en el ensayo Marshall.

La estabilidad media de las cuatro probetas (E_m) deberá ser como mínimo igual al 90% de la estabilidad de la mezcla de la fórmula de trabajo (E_t).

$$E_m \geq 0.9 E_t$$

³⁷ FUENTE: Manual de Normas ABC

Además, la estabilidad de cada probeta (E_i) deberá ser igual o superior a 80% del valor promedio de estabilidad, admitiéndose solo un valor individual por debajo de ese límite.

$$E_i \geq 0.8 E_m$$

Adicionalmente, con un mínimo de dos muestras por lote de la mezcla elaborada, se moldearán probetas (tres por muestra), para verificar en el laboratorio la resistencia de la mezcla ante la acción del agua mediante el ensayo de inmersión-compresión. Tres de las probetas se curarán en seco y tres bajo condición húmeda y se determina la resistencia promedio de cada grupo.

La pérdida de resistencia por efecto de la inmersión, no podrá exceder de 25%.

En cumplimiento de al menos una de estas exigencias implica el rechazo del lote representado por las muestras.

2.11.2. Flujo

El flujo medio de las probetas sometidas al ensayo de estabilidad (F_m) deberá encontrarse entre el 85% y el 115% del valor obtenido en la mezcla aprobada como fórmula de trabajo (F_t), pero no se permitirá que su valor se encuentre por fuera de los límites.

$$0.85 F_t \leq F_m \leq 1.15 F_t$$

2.11.3. Compactación

La densidad promedio (D_m) deberá ser, cuando menos, el 98% de la media obtenida al compactar en el laboratorio con la técnica Marshall, las cuatro probetas por lote (D_e).

$$D_m \geq 0.98 D_e$$

Además, la densidad de cada testigo individual (D_i) deberá ser mayor o igual al 97% de la densidad media de los testigos del lote (D_m), admitiéndose un solo valor defectuoso por lote³⁸.

$$D_i \geq 0.97 D_m$$

2.12. DIFERENCIAS DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS CON RESPECTO A LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES

A continuación, se da a conocer las diferencias existentes entre los pavimentos rígidos y flexibles:

Pavimento Rígido	Pavimento Flexible
Máximo 2 capas	Está constituida por varias capas
Losa de hormigón armado que absorbe todo el esfuerzo.	Lleva carpeta asfáltica y cada capa absorbe cierta cantidad de la carga.
Mayor costo inicial	Menos costo inicial
Menores deformaciones	Mayores deformaciones
Vida útil es mayor	Vida útil es menor
Existe menor fricción en la superficie de rodadura	Existe mayor fricción en la superficie de rodadura
Menor costo de mantenimiento	Mayor costo de mantenimiento
Color gris claro	Color gris oscuro o negro
Se crea discontinuidad en la capa de rodadura, llamadas juntas	La capa de rodadura es prácticamente continua
El tiempo de ejecución es menor	El tiempo de ejecución es mayor

³⁸ Se denomina lote a:

- 500m de mezcla densa caliente colocada.
- 3500 m2 de mezcla densa en caliente colocada.
- la obra ejecutada en una jornada trabajo.

2.13. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA INTERNA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

El control a una mezcla asfáltica es de importancia tanto desde su concepción, su cuidado y protección a lo largo de su vida útil.

Con el uso de la tecnología podemos verificar y comparar si los parámetros que consideramos en el momento de diseñar una mezcla asfáltica se han cumplido.

La reciente aplicación de tomografía computarizada con rayos-X para la caracterización de la estructura interna de mezclas asfálticas y del Sistema de Imágenes de Agregados, para la determinación de propiedades morfológicas de los agregados resulta ser un método cómodo para la visualización del comportamiento de la mezcla asfáltica en su conjunto, debido que surge la necesidad de reevaluar los parámetros usados en el diseño.

Las técnicas de captura y procesamiento de imágenes constituyen un ejemplo de tecnologías innovadoras para la caracterización de materiales utilizados en la construcción de pavimentos, especialmente agregados y mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas están constituídas por materiales granulares agregados finos y gruesos, asfalto, aditivos y vacíos. Cada uno de estos componentes contribuye a conformar la estructura interna de las mezclas asfálticas compactadas, la cual permite que las MA exhiban características de resistencia a fatiga, ahuellamientos, desgaste y envejecimiento, y también capacidad de drenaje, entre otros.

Algunos de los resultados esperados con esta metodología incluye la cuantificación de: vacíos y trabajo contacto agregado-agregado.

Las técnicas de captura y procesamiento de imágenes constituyen un ejemplo de tecnologías innovadoras para la caracterización de materiales utilizados en la construcción de pavimentos, especialmente agregados y mezclas asfálticas.

Estas técnicas hacen parte de un extenso grupo de metodologías no destructivas que proporcionan información única sobre la estructura interna de materiales porosos (i.e., microestructura) y sobre las características geométricas de materiales granulares.

Algunas de las técnicas de captura de imágenes bidimensionales disponibles para la caracterización de materiales porosos incluyen el uso de microscopios electrónicos (SEM, por sus siglas en inglés: scanning electron microscopy), técnicas de espectroscopia de imágenes (EDX y XPS, por sus siglas en inglés: energy dispersive X-ray y X-ray photoelectron spectroscopy, respectivamente) y microscopios de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés: atomic force microscopy).

Así mismo, técnicas de reconstrucción tridimensional de medios porosos incluyen visualización mediante resonancia magnética nuclear (NMR por sus siglas en inglés: nuclear magnetic resonance), visualización mediante microscopia electrónica de transmisión (TEM por sus siglas en inglés: transmission electron microscopy) y reconstrucción de imágenes obtenidas mediante tomografía computarizada con rayos-X (X-Ray CT, por su terminología en inglés: X-ray computed tomography).

En relación con la evaluación de las características geométricas de materiales granulares, los más recientes avances incluyen el uso de cámaras y de dispositivos láser para la obtención de imágenes de partículas de agregado y el desarrollo de técnicas de procesamiento de dichas imágenes. Dentro de estos dispositivos se encuentran:

- 1) VDG-40 Videograder,
- 2) Micrometrics OptiSizer.
- 3) UIAIA (por sus siglas en inglés: University of Illinois Aggregate Image Analyzer)
- 4) Sistema de Imágenes de Agregados (AIMS por su terminología en inglés: Aggregate Imaging System).

Con esta reciente aplicación de tomografía computarizada con rayos-X para la caracterización de la estructura interna de mezclas asfálticas y del Sistema de Imágenes de Agregados, se pretende demostrar la determinación de propiedades morfológicas de los agregados.

A continuación se describe la técnica de tomografía computarizada con rayos-X así como su aplicación en la caracterización de vacíos en mezclas asfálticas.

Luego, se discuten los principios de la caracterización morfológica de agregados y se describe el sistema AIMS.

Por último, se ofrece un breve resumen de ambas técnicas y se hace mención de sus principales ventajas y desventajas.

La aplicación de tomografía computarizada con rayos-X para la caracterización de la estructura interna de mezclas asfálticas y del Sistema de Imágenes de Agregados, para la determinación de propiedades morfológicas de los agregados. A continuación, se describe la técnica de tomografía computarizada con rayos-X así como su aplicación en la caracterización de vacíos en mezclas asfálticas y el estudio del flujo de agua en el interior de las mismas.

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 biológicos³⁹, suelos⁴⁰ y mezclas asfálticas⁴¹.

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.⁴²
- Caracterizar aspectos relacionados con su compactación⁴³.
- Identificar la degradación de los agregados que componen estos materiales⁴⁴, entre otros.

³⁹ Kosek et al., 2005

⁴⁰ Otani y Obara, 2004

⁴¹ Masad, 2004

⁴² Masad et al., 2002, Álvarez et al., 2007.

⁴³ Watson et al., 2004.

2.13.1. Descripción de la técnica de rayos-X para caracterizar mezclas asfálticas

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

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 pixeles, $\#P$. 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:

$$R_{x,y} = \frac{L_{x,y}}{\#p}$$

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 pixel.

La estructura de vacíos de las mezclas asfálticas determina en gran medida el desempeño del material en la obra. El parámetro que comúnmente se ha empleado para caracterizar los- vacíos de mezclas asfálticas es el contenido total de vacíos, el cual constituye uno de los principales parámetros de control dentro de los procesos de diseño (método Marshall o Superpave) y construcción de estas mezclas (Instituto del Asfalto, 2001). Sin embargo, el contenido total de vacíos no permite cuantificar el tamaño, distribución o conectividad de los vacíos individuales que existen en el interior de la mezcla. Dicha cuantificación ha cobrado importancia en la medida en que investigaciones recientes, desarrolladas aplicando técnicas de rayos-X, han demostrado que mezclas asfálticas compuestas por los mismos materiales, en las mismas proporciones y con el mismo contenido total de vacíos, presentan diferentes desempeños y susceptibilidades al daño por humedad.

⁴⁴ Gatchalian et al., 2006.

En estos estudios, las imágenes obtenidas a través de técnicas de rayos-X se procesaron usando algoritmos computacionales para:

- Realizar análisis probabilísticos de vacíos en la muestra.
- Observar el trabajo agregado-agregado

Este análisis permitió la cuantificación del número de puntos de contacto en una determinada imagen digital como indicador de las condiciones de contacto agregado-agregado alcanzadas por la mezcla, del trabajo agregado-agregado de una mezcla depende la respuesta mecánica que esta brinde.

Se puede comprobar que la capilaridad no es un fenómeno asociado exclusivamente a los suelos, sino que también se presenta en las mezclas asfálticas, y que dependiendo de las condiciones en las que se encuentren puede constituir un medio de transporte de humedad, sugiere que la capilaridad existe porque el agua no está en contacto directo con el asfalto sino con una matriz conformada por la mezcla del asfalto y la fracción fina de los agregados y porque el tamaño de los vacíos conectados en mezclas de gradación densa es suficientemente pequeño para hacer que las rutas de vacíos conectados actúen como tubos capilares.

Este tipo de análisis las pruebas de laboratorio y de simulaciones numéricas, constituye un enfoque novedoso que ha permitido ampliar el conocimiento sobre los factores micro mecánicos que determinan el desempeño y la durabilidad de los pavimentos.

Los agregados constituyen el componente mayoritario de todas las capas de un pavimento, en el caso de materiales ligados las características morfológicas de los agregados juegan un papel primordial en la resistencia a los procesos de deterioro por fatiga.

2.13.2. Descripción del equipo a utilizar

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. El objeto a escanear se ubica entre la fuente y el detector, 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.

Cada una de las mediciones antes descritas se denomina vistas. 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 mostrado en la figura que se observa). 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.

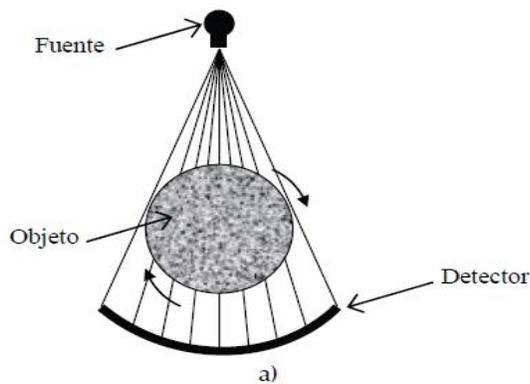


Figura 1.8.23 Rayos-X ha los cuales está sometido una Muestra⁴⁵

Dichas imágenes se denominan “secciones”, ya que muestran la sección interior del objeto como si este hubiera sido cortado en un plano horizontal.

⁴⁵ FUENTE: Revista XIX Simposio Colombiano 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.

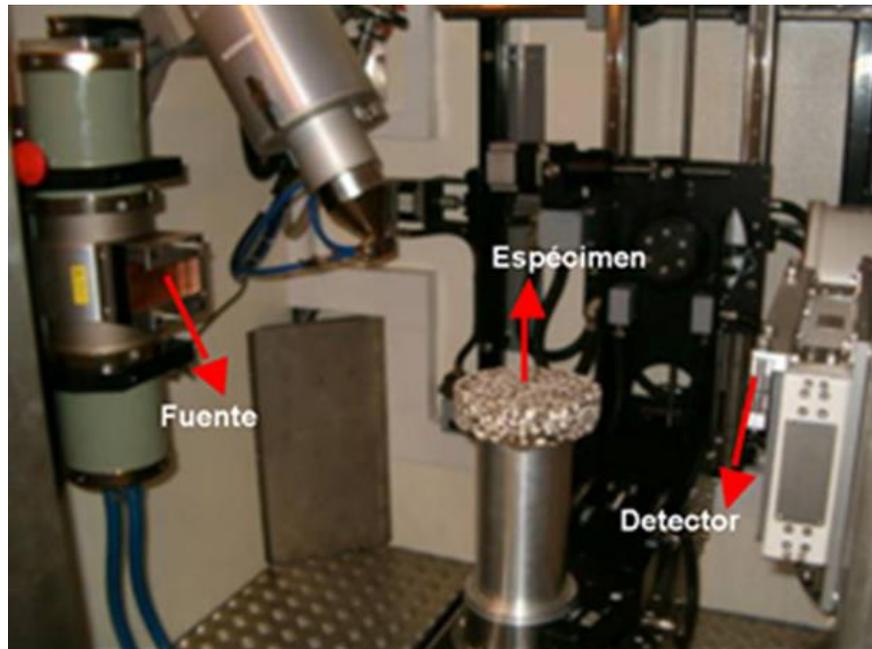


Figura 1.8.24 Briqueta en ensayo de TC-RX⁴⁶

Estas imágenes permiten identificar los diferentes elementos que conforman la mezcla (agregados, matriz asfáltica y vacía) 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.

Caracterización de la estructura de vacíos y del flujo de agua en mezclas asfálticas mediante el análisis de imágenes de rayos-X

La identificación de los vacíos al interior de la mezcla se basa en la escala de grises de las secciones obtenidas durante el escaneo con rayos-X (Figura 2.23 – 2.24). Como se mencionó previamente, el color de cada partícula en la imagen está directamente relacionado con la densidad del material que representa, siendo los

⁴⁶ FUENTE: Revista XIX Simposio Colombiano de Pavimentos.

objetos más oscuros los de menor densidad (vacíos) y los más claros los de mayor densidad (agregados).

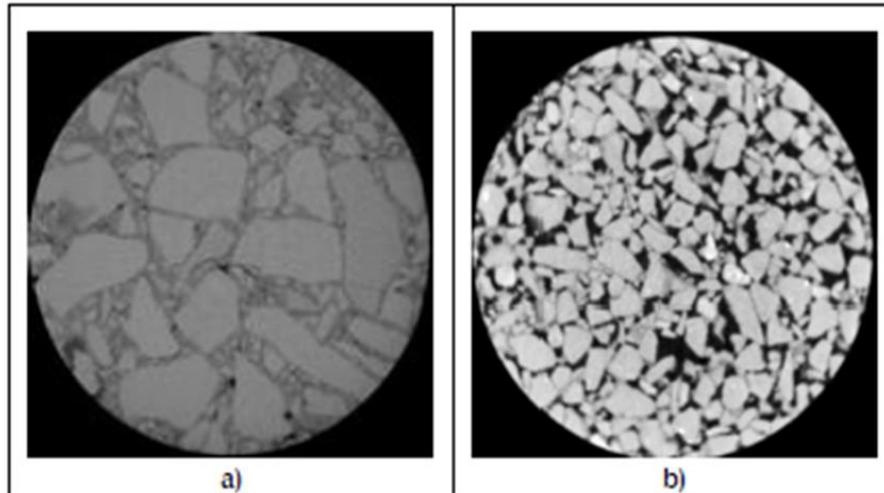


Figura 1.8.25 Tomografías computarizadas TC-RX⁴⁷

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 la cantidad, tamaño y posición de los vacíos se utilizan 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.

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:

$$P_i = \frac{A_{v_i}}{A_{t_i}}$$

$$P_{TOTAL} = \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{N}$$

⁴⁷ FUENTE: Revista XIX Simposio Colombiano de Pavimentos.

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 (radio) de los vacíos en cada imagen se estima de la siguiente forma:

$$\overline{R}_i = \sqrt{\frac{A_{Vi}}{\pi M_i}}$$

Dónde: 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 (calculado y de laboratorio). Los vacíos efectivos de una mezcla asfáltica se pueden identificar mediante el empleo de algoritmos computacionales que hacen uso de las imágenes binarias resultantes del procesamiento de imágenes antes descrito.

Estas imágenes se procesan utilizando un software especializado que recorre una a una las secciones del objeto para determinar las rutas de vacíos de aire conectadas al interior de la mezcla.

El excesivo contenido de vacíos provoca conectividad lo que provee las condiciones propicias para el desarrollo de daño por humedad (usualmente denominado stripping). Este tipo de daño ha sido reconocido en las últimas tres décadas como una de las principales causas de deterioro temprano de las carpetas de rodadura asfáltica.

Los avances descritos muestran cómo la técnica de tomografía computarizada con rayos-X, en combinación con las de procesamiento de imágenes, permiten una caracterización detallada de las mezclas asfálticas. Este tipo de análisis, acompañado de pruebas de laboratorio y de simulaciones numéricas, constituye un enfoque novedoso que ha permitido ampliar el conocimiento sobre los factores micro-mecánicos que determinan el desempeño y la durabilidad de los pavimentos.

2.13.3. Técnicas Basadas en imágenes para la Cuantificación de la Morfología de los Agregados

Los agregados constituyen el componente mayoritario (tanto en peso como en volumen) de todas las capas de un pavimento.

Por esta razón, la respuesta mecánica y el desempeño de las estructuras de pavimento están influenciados directamente por las características de estos materiales. En particular, las propiedades físicas superficiales o morfológicas están relacionadas con la compactibilidad, trabajabilidad, rigidez (módulo resiliente) y resistencia ante deformaciones permanentes de las diferentes capas que incluyen estos materiales, ya sea en estado simple o ligado (mezcla de agregados con asfalto, cemento hidráulico, cal, cenizas volantes, etc.). Adicionalmente, se ha demostrado que en el caso de materiales ligados las características morfológicas de los agregados juegan un papel primordial en la resistencia a los procesos de deterioro por fatiga y en las características hidráulicas del compuesto.

2.13.3.1. Caracterización morfológica de agregados

Las características geométricas de los agregados incluyen forma, angularidad y textura superficial. Estas propiedades se pueden definir considerando diferentes escalas con relaciónal tamaño de la partícula. Mientras la forma se refiere a los cambios de las proporciones de la partícula, la angularidad refleja modificaciones en las esquinas que se superponen a la forma.

La textura, por su parte, abarca las irregularidades superficiales definidas a una escala mucho menor, de tal manera que éstas no determinan directamente ni la forma ni la angularidad.

En general, aquellos agregados de formas cercanas a la cúbica, angulares, de textura rugosa y con capacidad para mantener estas propiedades a lo largo de la vida útil de las estructuras, son preferidos para aplicaciones en pavimentos.

En la actualidad existen diversos ensayos para determinar las características geométricas de los agregados basados en:

- Evaluación del acomodamiento de partículas vertidas por flujo libre en recipientes.
- Inspección visual.
- Medición de dimensiones usando plantillas y calibradores.
- Evaluación del acomodamiento de partículas compactadas en recipientes
- Aplicación de esfuerzos cortantes en muestras compactadas.
- Uso de cámaras para el registro de imágenes.
- Uso de dispositivos láser.

Sin embargo, la práctica actual de diseño y control de calidad de agregados se limita a ensayos básicos pertenecientes a los primeros tres grupos mencionados, de los cuales sólo es posible obtener mediciones indirectas de la morfología de los agregados. Este es el caso de los ensayos estándar incluidos en la metodología de diseño de mezclas asfálticas Superpave (Instituto del Asfalto, 2001), y de los ensayos sugeridos por el Invías para la evaluación de la calidad de agregados empleados en bases de pavimento.

A nivel general, las principales limitaciones y desventajas de dichos ensayos son):

Limitada repetitividad y reproducibilidad.

Dificultad para independizar las evaluaciones en términos de forma, angularidad y textura superficial (dada la medición indirecta de las propiedades).

- Largos tiempos de ensayo.
- Subjetividad de la evaluación debido a la intervención del operario.
- Dificultad para incorporar directamente los resultados en métodos analíticos de predicción del desempeño de las estructuras.
- Obtención de valores promedios como resultado de los ensayos (en lugar de distribuciones).

Estas limitaciones han promovido el desarrollo e implementación de métodos más eficaces, tales como el uso de cámaras y dispositivos láser para capturar y procesar imágenes de partículas de agregado.

A continuación se describe la técnica de caracterización de agregados mediante imágenes AIMS, una de las más recientes y con mayor proyección en el futuro cercano.

Angularidad, forma y textura

Esquemmatización de:

- (a) características geométricas de los agregados.
- (b) agregados redondeados, con alta angularidad y textura no rugosa.
- (c) agregados alargados con baja angularidad y textura rugosa
- (d) Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso ASTM D5821.
- (e) Partículas aplanadas y alargadas en el agregado grueso ASTM D4791.
- (f) Contenido de vacíos en agregado fino no compactado AASHTO T304.
- (g) Proporción de partículas fracturadas mecánicamente en el agregado grueso Invías para INV E-227
- (h) Bases granulares Índices de aplanamiento y alargamiento INV E-230.

Las imágenes en blanco y negro, usadas para generar proyecciones en dos dimensiones, son tomadas usando el sistema de iluminación inferior, mientras que el sistema de iluminación superior es aplicado para registrar las imágenes en escala de grises.

Una vez que las imágenes son capturadas, estas se procesan en un software especializado

Con base en las descripciones anteriores, es posible concluir que el AIMS posee importantes ventajas con respecto a los métodos de caracterización tradicionales, dentro de las cuales se puede señalar:

- Menor variabilidad de los índices medidos con el sistema.
- Posibilidad de analizar agregados finos y gruesos empleando el mismo equipo.
- Obtención de análisis detallados de textura.
- Posibilidad de utilizar diferentes resoluciones con base en el tamaño de la partícula.

Adicionalmente, la medición independiente de cada una de las características geométricas del agregado se constituye en un avance importante para el análisis de su efecto real en el desempeño de las estructuras de pavimento.

A nivel más general, este sistema ofrece ventajas adicionales como la posibilidad de evaluar cuantitativamente el efecto de diferentes técnicas de producción de agregados (explotación y trituración) sobre sus características geométricas, con miras a la optimización de los procesos de acuerdo con la fuente y la aplicación final. Así mismo, esta técnica se puede emplear para cuantificar directamente el cambio en las propiedades superficiales de los agregados tras ser sometidos a ensayos de caracterización y evaluación de calidad en laboratorio (después de ensayos de pavimento).

2.14. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO DE TOMOGRAFÍA

Se trata de un tomógrafo espiral o helicoidal multicorte de última generación que posee más detectores ubicados en forma de abanico, formando un sistema tubo-detectores formando un arco móvil y una rotación continua alrededor de la mesa del objeto.

Determinando una resolución convencional en un equipo helicoidal podemos realizar cortes cada 0.5mm sin contraste en la sección; con una alta resolución podemos obtener secciones desde los 0.5 mm pero con contraste; es decir que se observan partículas más a detalle, pudiendo definir las capas blandas de los vasos sanguíneos para tener una idea de la claridad de la imagen.

Este equipo tiene un barrido de 360 ° debido a que los detectores están ubicados dentro del arco de observación.

Utilizado en el campo médico, tomógrafo de cuarta generación, el cual nos proporciona dos tipos de resolución de imagen que nos permite realizar múltiples cortes al objeto y dependiendo el uso de la imagen realizar mediante la consola de datos una observación a detalles de las partículas que conforman el objeto analizado.

2.15. PARTES DEL TOMÓGRAFO

El equipo a utilizar posee una fuente y detectores distribuidos en arco que son rotatorios, y la mesa del objeto que se mantiene inmóvil verticalmente y según el análisis a realizar la mesa realiza movimientos horizontales.

2.16. TIPOS DE RESOLUCION DE LAS IMÁGENES BIDIMENSIONALES

2.16.1. Resolución convencional o espacial de la imagen

Describe el grado de borrosidad o indefinición presente en la imagen y se define como la habilidad que posee el equipo para discriminar los objetos pequeños de diferentes densidades que están ubicados muy próximos, por lo que los objetos pequeños aparecerán en la pantalla como un solo objeto.

Limitado por:

- La función de esparcimiento del punto éste describe por la indefinición de un punto en el objeto que no se reproduce como punto sino como un círculo medible desde afuera.
- Función de esparcimiento de una línea, esta definición nos da como resultado que una línea dentro de la imagen se extiende más allá de la ubicación y dimensiones reales de ésta.

2.16.2. Resolución de contraste o alta resolución

En TC-RX esta resolución se define como la habilidad que tiene el sistema de imágenes para diferenciar pequeños cambios de densidad diferenciando objetos de 1 a 3 mm con claridad y como partículas independientes.

Nos proporciona mayor sensibilidad para observar puntos y líneas desde su dimensión real, permitiendo cortes de secciones más finas.

Al aumentar la densidad de las masas analizadas, se debe aumentar el tiempo de análisis para que la penetración de los rayos-X sea más lenta y nos proporcione imágenes monocromáticas más nítidas

2.17. FRECUENCIA DE MUESTREO

Nos permite el muestreo de partículas hasta del tamaño de 1 mm, dependiendo de la resolución de imagen determinado en la programación del equipo se definirá el tiempo de muestreo que se trata de la mayor resolución deseada el tiempo de penetración de los rayos – X es mayor dependiendo también de la masa del objeto analizado.

2.18. TOMÓGRAFO ELÉCTRICO ENSAMBLADO PARA ANÁLISIS DE PAVIMENTOS.

El equipo armado para los primeros ensayos de análisis en suelos y posteriormente analizado de mezclas asfálticas ensamblado por primera vez en EE.UU y replicado en Colombia por el Instituto de Pavimentos, se realizó a través de un tomógrafo de definición convencional de tercera generación , su desarrollo constante a través de la mejora de equipos para la obtención de los datos así como de los programas de inversión para la intervención hace que su utilización sea cada vez más frecuente .

Una de las características del equipo es que al aumentar la masa del objeto analizado se aumenta la radiación para así poder estudiar imágenes a detalle, en este equipo la mesa del objeto gira mientras el detector y la fuente se mantienen estáticos

La ventaja de este método es que nos brinda imágenes bidimensionales, sin alterar la masa analizada.

CAPÍTULO III

INVESTIGACIÓN DE LA ESTRUCTURA INTERNA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS A PARTIR DE TOMOGRAFÍAS COMPUTARIZADAS DE RAYOS-X

3.1. ESTUDIO DE AGREGADOS

3.1.2. Toma de Muestras (ASTM C75-AASHTO T2)

El muestreo es una de las funciones más importantes en el control de agregados minerales. Por lo que su obtención debe regirse a las normas de procedimientos planteadas, buscando que dichas muestras sean lo más representativas.

Para nuestro estudio se hizo el muestreo de acopios de plantas chancadoras.

- Agregados chancados procedentes del RÍO CAMACHO (Utilizado en proyectos de SEDECA⁴⁸ TARIJA).



FIGURA 1.8.26 Ubicación Satelital -Planta Asfáltica y Chancadora de Charaja⁴⁹

⁴⁸ Servicio Departamental de Caminos

⁴⁹ FUENTE: Google Earth

- Agregados chancados procedentes del RÍO TOLOMOSA (Utilizado en proyectos de SEDECA TARIJA).

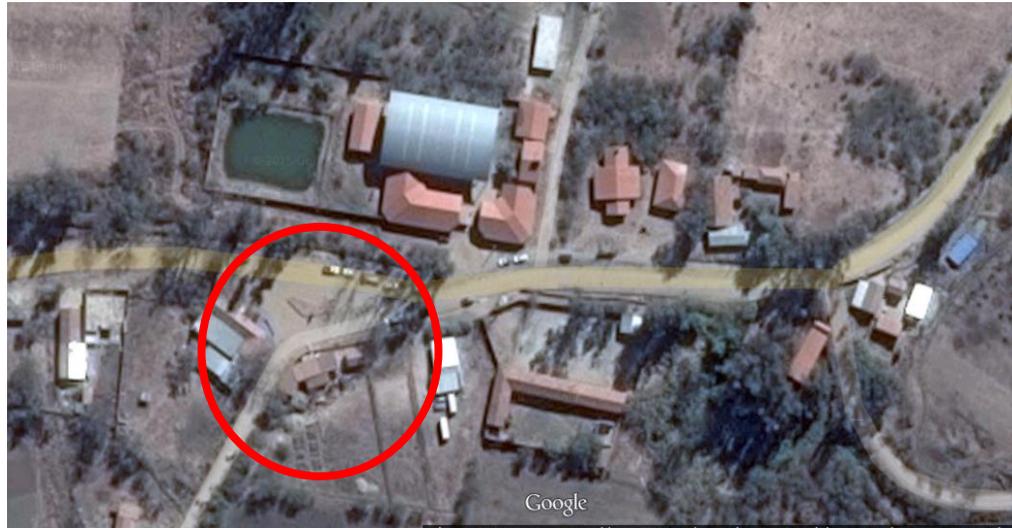


FIGURA 1.8.27 Ubicación Satelital - Planta Chancadora Vafercon-Tolomosa⁵⁰

- Agregados chancados procedentes de SAN MATEO pero fueron obtenidos del lugar de acopio ubicado en la localidad de “La Pintada” (Utilizado en proyectos de HAM⁵¹ de la provincia CERCADO).



FIGURA 1.8.28 Ubicación Satelital - Planta Asfáltica y de Acopio de Materiales - La Pintada⁵²

⁵⁰ FUENTE: Google Earth

⁵¹ Honorable Alcaldía Municipal

⁵² FUENTE: Google Earth

- Agregados chancados de Provenientes de la Zona Alta de Tarija (Utilizado en proyectos del consorcio VIAL COPACABANA en TARIJA).



**FIGURA 1.8.29 Ubicación Satelital Planta Asfáltica y de Acopio de Materiales
-El Molino⁵³**

3.1.3. Cuarteo de Materiales (ASTM C702-AASHTO T248)

➤ **Objetivo.-**

Homogeneizar los agregados de tal forma que éste, sea representativo al total de la muestra.

➤ **Procedimiento.-**

- Para la caracterización de materiales se usó el Cuarteo Mecánico; el material obtenido de las plantas de acopio es llevado a laboratorio para realizar los ensayos correspondientes para así determinar las características del mismo.
- Se hace pasar el material por las aberturas del cuarteador, hasta completar la cantidad requerida según el ensayo a realizar.

⁵³FUENTE: Google Earth

Procedimiento Gráfico 1.8.1 CUARTEO MECÁNICO DE MUESTRAS⁵⁴



Se procede a hacer pasar las muestras por las Aberturas que presenta el cuarteador mecánico tanto para finos como para gruesos.

3.1.4. Análisis Granulométrico (ASTM E40 – AASHTO T27 – 99)

➤ **Objetivo**

Determinar la distribución por tamaño, de las partículas de los agregados finos y gruesos; expresado en porcentajes del peso total a través de una serie de tamices de diferentes aberturas las cuales se hacen progresivamente más pequeñas y se pesa el material retenido en cada tamiz.

➤ **Procedimiento**

- Se preparan tres muestras significativas de agregado fino y grueso.
- Se determina el peso de la muestra después del secado a 110 °C, hasta obtener un peso constante.
- Se realiza la selección del juego de tamices, disponiéndolos en orden decrecientes de aberturas.
- Se procede a hacer pasar la muestra a través de las mallas para luego obtener el material retenido en cada una de ellas, con aproximación de 0,1 gr.; mediante movimientos rotatorios de los tamices.

⁵⁴ FUENTE: Elaboración Propia

Procedimiento Gráfico 1.8.2 GRANULOMETRÍA DE AGREGADOS⁵⁵



- La muestra es cuarteada y posteriormente lavada para poder determinar con mayor exactitud el contenido de fino.



-El material es llevado al Horno para su secado.



La muestra es pasada por el juego de tamices

⁵⁵ FUENTE: Elaboración Propia

TABLA 1.8.9 Granulometría de Materiales - HAM-LA PINTADA

Tamices	GRAVA %Que pasa del total	GRAVILLA % Que pasa del total	FINO %Que pasa del total	FILLER % que pasa del total
2 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	67,42	100,00	100,00	100,00
1/2"	8,86	96,73	100,00	100,00
3/8"	1,61	64,81	99,91	100,00
N°4	0,36	6,27	94,69	98,57
N°8	0,35	0,91	74,65	95,12
N°40	0,33	0,75	33,92	82,45
N°200	0,25	0,68	3,47	70,19

Grafica 1.8.1 CURVAS GRANULOMÉTRICAS - HAM-LA PINTADA

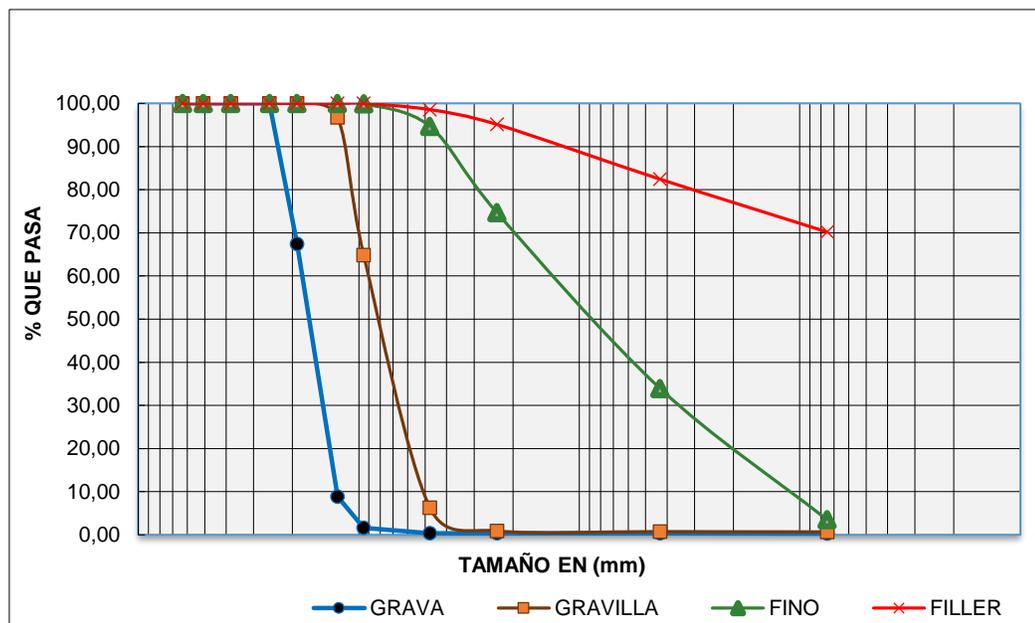


TABLA 1.8.10 Granulometría de Materiales - SEDECA-CHARAJA

Tamices	GRAVA %Que pasa del total	GRAVILLA %Que pasa del total	FINO %Que pasa del total
2 1/2"	100,00	100,00	100,00
2"	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00
3/4"	84,47	100,00	100,00
1/2"	24,00	99,92	100,00
3/8"	5,83	97,36	100,00
N°4	0,58	6,13	98,93
N°8	0,56	1,39	79,85
N°40	0,52	1,26	27,46
N°200	0,50	1,23	9,13

Grafica 1.8.2 CURVAS GRANULOMÉTRICAS - SEDECA-CHARAJA

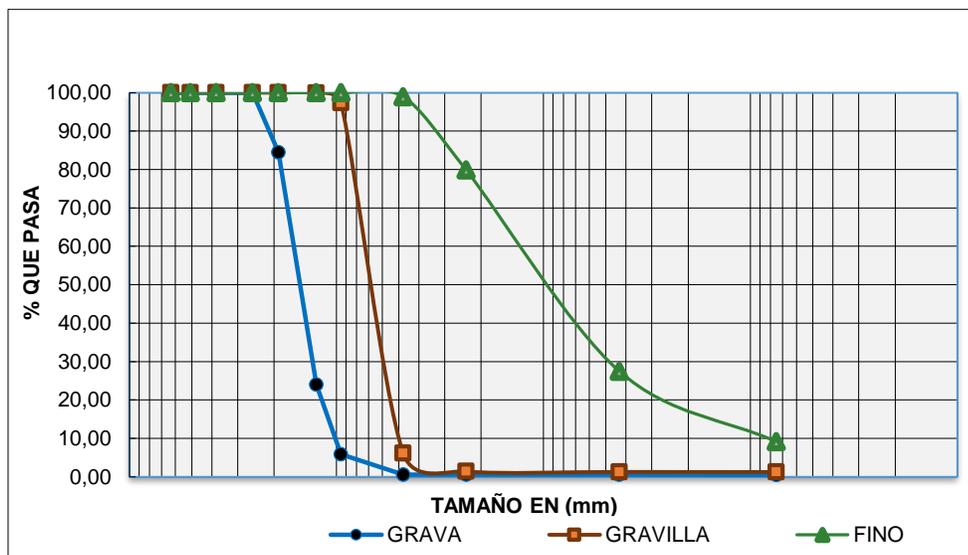


TABLA 1.8.11 Granulometría de Materiales - SEDECA-TOLOMOSA

Tamices	GRAVA %Que pasa del total	GRAVILLA %Que pasa del total	FINO %Que pasa del total	FILLER %Que pasa del total
2 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	99,50	100,00	100,00	100,00
3/4"	82,72	100,00	100,00	100,00
1/2"	31,22	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,21	97,22	99,64	100,00
Nº4	0,62	4,92	98,76	98,80
Nº8	0,59	0,69	81,06	95,59
Nº40	0,54	0,31	22,07	83,60
Nº200	0,46	0,27	3,81	71,34

Grafica 1.8.3 CURVAS GRANULOMÉTRICAS - SEDECA-TOLOMOSA

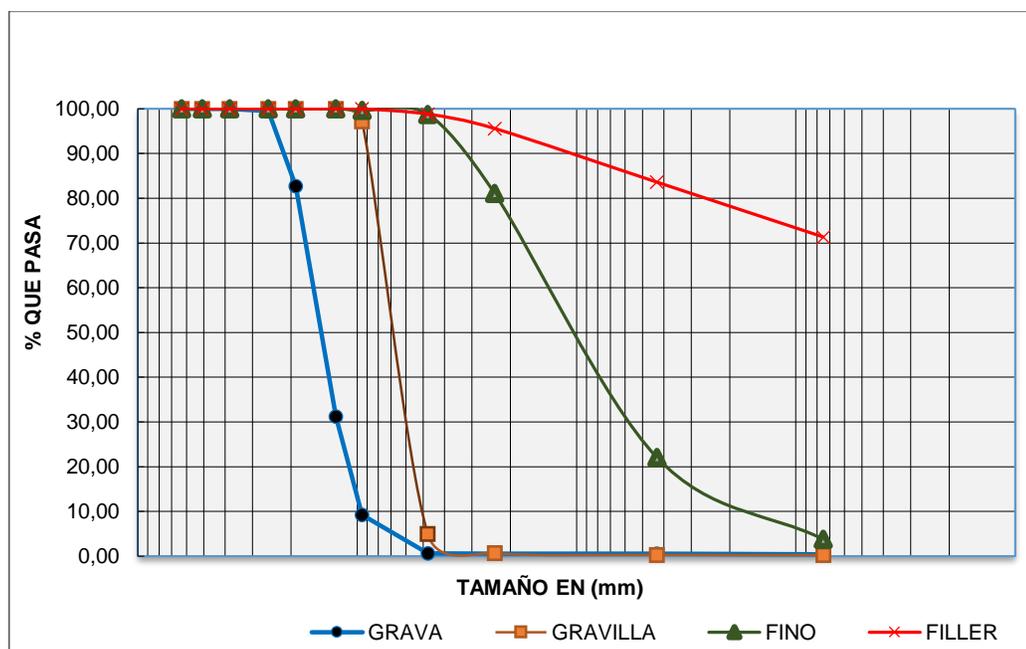
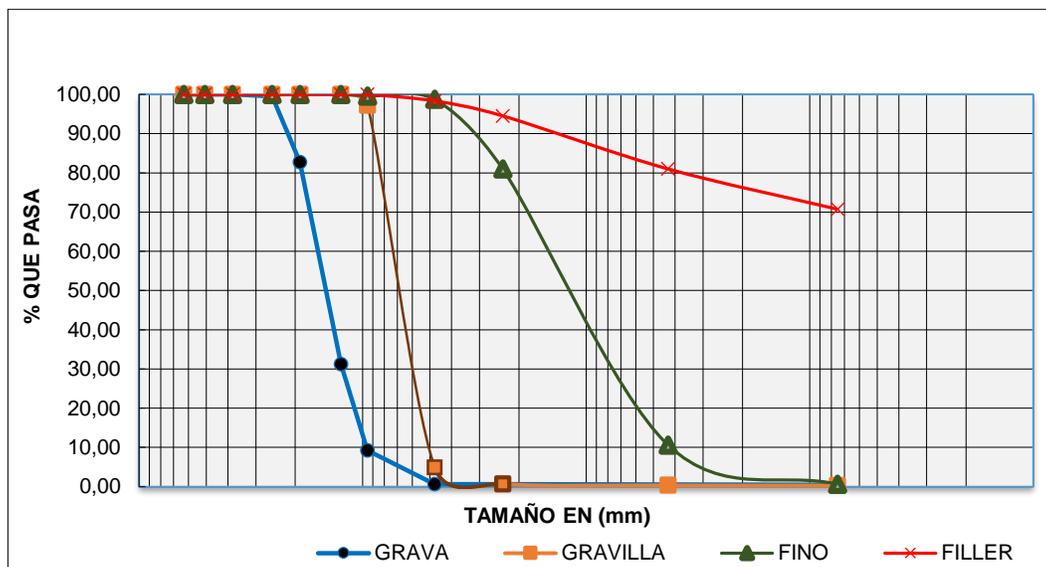


TABLA 1.8.12 Granulometría de los Materiales - ACV-ELMOLINO

Tamices	GRAVA %Que pasa del total	GRAVILLA %Que pasa del total	FINO %Que pasa del total	FILLER %Que pasa del total
2 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	99,50	100,00	100,00	100,00
3/4"	82,72	100,00	100,00	100,00
1/2"	31,22	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,21	97,22	99,60	100,00
N°4	0,62	4,92	98,72	98,35
N°8	0,59	0,69	80,96	94,54
N°40	0,54	0,31	10,58	81,00
N°200	0,46	0,27	0,60	70,73

Grafica 1.8.4 CURVAS GRANULOMÉTRICAS -ACV-EL MOLINO



3.1.5. Peso Específico de los Agregados Grueso (ASTM E127 – AASTHO T85-91) y Fino (ASTM E128 – AASHTO T84 – 00)

➤ Objetivo

Determinar el peso específico corriente (bruto), el peso específico saturado, peso específico aparente y el porcentaje de absorción de los agregados, después de las 24 horas en agua a temperatura ambiente.

➤ Procedimiento (Agregado grueso)

- Se realiza el correspondiente cuarteo para obtención de la muestra para el ensayo.
- La muestra es tamizada por la malla de abertura de 4.75 mm (Nº4).
- Se satura la muestra retenida en el tamiz Nº4 por 24 horas en agua a temperatura ambiente.
- Se extrae del agua el agregado y es secado superficialmente hasta que no se observe película del agua visible, pero la muestra debe parecer húmeda.
- Se pesan 5 kg, de muestra superficialmente seca, la cual será puesta en una cestilla de malla metálica, la cual es pesada sumergiéndola por completo en un recipiente con agua para determinar el peso de la muestra sumergida; cabe señalar que el canastillo sumergido no está apoyado en la base del recipiente de agua.
- La muestra es retirada de la malla metálica y puesta en un recipiente para ser llevado a secado en horno a 110°C hasta peso constante.
- Una vez retirada la muestra del horno esta es pesada para determinar el peso seco de la muestra
- Este procedimiento se lleva acabo con tres porciones de agregado por ensayo.

Procedimiento Gráfico 1.8.3 PESO ESPECÍFICO EN AGREGADOS GRUESOS⁵⁶



- El material retenido en el tamiz N°4 es puesto a saturación.



-Se seca la muestra superficialmente para ser colocada en el canastillo y ser pesado.



-El material saturado finalmente es secado en el Horno para obtener la absorción del material

⁵⁶ FUENTE: Elaboración Propia

➤ **Procedimiento (Agregado fino)**

- Se realiza el correspondiente cuarteo para obtención de la muestra para el ensayo, la muestra es secada en horno hasta 110°C, peso constante.
- Se tamiza el agregado fino por la malla de 2.36 mm de abertura (N°8), como retiene más del 15% del peso total tamizado, éste material retenido también es analizado para obtener un peso específico parcial.
- Se extiende la muestra en una superficie plana y expuesta a una suave corriente de aire tibio hasta que alcance la condición saturada de superficie seca; para comprobar que la muestra sin compactar esta lista para proceder al ensayo, es colocada en el molde tronco-cónico; compácte la superficie suavemente apisonando 25 veces con la varilla metálica en tres capas y levante el molde verticalmente.
- Si hay humedad libre el cono del agregado se retendrá en su forma y se debe continuar secando; se realiza esta comprobación hasta al ser retirado el molde el agregado se desliza con un talud natural que es cuando este ha alcanzado una condición de sequedad superficial.
- Se pesaran 500 gr de la muestra con la ayuda de un embudo sin perder muestra, éste es puesto en un matraz.
- Se añade agua al matraz poco a poco con movimientos rotacionales para eliminar las burbujas de aire que quedan atrapadas en el agregado, el tiempo que sea necesario.
- Se llena de agua el matraz hasta los 500ml, y se determina el peso del matraz más agua y muestra.
- Se saca el material del matraz y este es llevado a una estufa para ser secado y posterior pesado.
- El material retenido por la malla N°8 es analizado de igual manera, pero éste es secado como si se tratase de material grueso.

Procedimiento Gráfico 1.8.4 PESO ESPECÍFICO EN FINOS⁵⁷



-La muestra saturada es secada superficialmente



-Se comprueba que el material se encuentra con superficie seca pero saturada con el pistón y molde tronco-cónico



-El material es introducido al matraz para determinar su P.E

⁵⁷ FUENTE: Elaboración propia

TABLA 1.8.13 Peso Específico - HAM-LA PINTADA

PESO ESPECÍFICO	GRAVA	GRAVILLA	FINO	FILLER
Peso específico a Granel (gr/cm ³)	2,571	2,579	2,608	2,652
Peso específico Saturado sin humedad Superficial (gr/cm ³)	2,620	2,627	2,666	2,728
Peso específico Aparente (gr/cm ³)	2,703	2,708	2,770	2,869
Porcentaje de Absorción (%)	1,907	1,857	2,256	2,875

TABLA 1.8.14 Peso Específico - SEDECA-CHARAJA

PESO ESPECÍFICO	GRAVA	GRAVILLA	FINO
Peso específico a Granel (gr/cm ³)	2,554	2,535	2,614
Peso específico Saturado sin humedad Superficial (gr/cm ³)	2,579	2,582	2,682
Peso específico Aparente (gr/cm ³)	2,648	2,660	2,806
Porcentaje de Absorción (%)	1,641	1,851	2,624

TABLA 1.8.15 Peso Específico - SEDECA-TOLOMOSA

PESO ESPECÍFICO	GRAVA	GRAVILLA	FINO	FILLER
Peso específico a Granel (gr/cm ³)	2,594	2,595	2,653	2,659
Peso específico Saturado sin humedad Superficial (gr/cm ³)	2,642	2,643	2,706	2,735
Peso específico Aparente (gr/cm ³)	2,725	2,726	2,803	2,878
Porcentaje de Absorción (%)	1,853	1,857	2,034	2,813

TABLA 1.8.16 Peso Específico - ACV-EL MOLINO

PESO ESPECÍFICO	GRAVA	GRAVILLA	FINO	FILLER
Peso específico a Granel (gr/cm ³)	2,501	2,599	2,619	2,693
Peso específico Saturado sin humedad Superficial (gr/cm ³)	2,548	2,635	2,669	2,770
Peso específico Aparente (gr/cm ³)	2,625	2,695	2,757	2,918
Porcentaje de Absorción (%)	1,889	1,375	1,933	2,836

3.1.6. Peso Unitario (ASTM C29)

➤ Objetivo

Determinar la relación entre el peso de un material y el volumen ocupado por el mismo, expresado en Kg/m³.

➤ Procedimiento

- Se usará para este ensayo un molde cilíndrico, el cual es calibrado para obtener su volumen.
- El material en estado natural (entendiéndose en estado natural a un material con humedad entre el 1% y 3%), es decir que no se encuentre saturado; y a temperatura ambiente.
- Es llenado en el molde cilíndrico de volumen conocido, el cual es enrazado y pesado para determinar el peso suelto.
- Para el peso compactado se llena el recipiente de tamaño y volumen conocido en tres partes, cada una es apisonada con una varilla metálica con 25 golpes; se enraza el recipiente y es pesado.

Procedimiento Gráfico 1.8.5 PESO UNITARIO DE LOS AGREGADOS⁵⁸



-Los agregados son colocados compactado y suelto en un molde cilíndrico de volumen conocido.

⁵⁸ FUENTE: Elaboración Propia



-El material enrazado es pesado

TABLA 1.8.17 Peso Unitario - HAM-LA PINTADA

PESO UNITARIO	GRAVA	GRAVILLA	FINO	FILLER
Suelto (gr/cm ³)	1,434	1,402	1,690	1,752
Compactado (gr/cm ³)	1,526	1,533	1,809	1,966

TABLA 1.8.18 Peso Unitario - SEDECA-CHARAJA

PESO UNITARIO	GRAVA	GRAVILLA	FINO
Suelto (gr/cm ³)	1,413	1,308	1,647
Compactado (gr/cm ³)	1,513	1,446	1,850

TABLA 1.8.19 Peso Unitario - SEDECA-TOLOMOSA

PESO UNITARIO	GRAVA	GRAVILLA	FINO	FILLER
Suelto (gr/cm ³)	1,392	1,284	1,577	1,761
Compactado (gr/cm ³)	1,501	1,402	1,747	1,994

TABLA 1.8.20 Peso Unitario - ACV-EL MOLINO

PESO UNITARIO	GRAVA	GRAVILLA	FINO	FILLER
Suelto (gr/cm ³)	1,305	1,248	1,750	1,743
Compactado (gr/cm ³)	1,453	1,398	1,911	1,955

3.1.7. Ensayo de Abrasión (ASTM E131 – AASHTO T96 – 99)

➤ Objetivo

Determinar la resistencia a la abrasión de los agregados gruesos triturados y no triturados por medio del desgaste por carga abrasiva en la máquina de los Ángeles.

➤ Observaciones

La cantidad de material a ensayar y el número de esferas a incluir depende de la granulometría del agregado grueso.

TABLA 1.8.21 Número de Esferas Para Ensayo de Abrasión⁵⁹

GRADOS	NUMERO DE ESFERAS	PESO DE LAS CARGAS EN GRAMOS
A	12	5000±25
B	11	4584±25
C	8	3330±20
D	6	5000±25
E	12	5000±25
F	12	5000±25
G	12	5000±25

TABLA 1.8.22 Peso de los Agregados para Ensayo de Abrasión⁶⁰

TAMAÑO DE LOS TAMICES		PESO Y GRANULOMETRIA DE LA MUESTRA DE PRUEBA EN GRAMOS						
PASA	RETIENE	A	B	C	D	E	F	G
3"	2 1/2"					2500		
2 1/2"	1 1/2"					2500		
1 1/2"	1"	1250				5000	5000	
1"	3/4"	1250					5000	5000
3/4"	1/2"	1250	2500					5000
1/2"	3/8"	1250	2500					
3/8"	1/4"			2500				
1/4"	Nº4			2500				
Nº4	Nº8				5000			

➤ Procedimiento

- El tambor de la máquina es cargado con las esferas y la muestra determinada según la gradación granulométrica (tabla 3.1.14).

⁵⁹ FUENTE: Manual de Ensayos de Suelos y Materiales/Asfaltos ABC

⁶⁰ FUENTE: Manual de Ensayos de Suelos y Materiales/Asfaltos ABC

- Se hace girar el tambor a una velocidad de 30 a 33 revoluciones por minuto. Para las gradaciones A, B, C y D, la máquina dará 500 vueltas, para las gradaciones E, F y G, el número de vueltas será de 1000.
- Se descargara el material del tambor y se procede a la determinación de la fracción del material retenido en el tamiz de 1.68 mm. (N°12).
- Se calcula la diferencia entre el peso original y el peso final de la muestra expresado como un porcentaje, es reportado como el porcentaje de desgaste.

Procedimiento Gráfico 1.8.6 DESGASTE DE LOS ÁNGELES (ABRASIÓN)⁶¹



La muestra lavada y secada en horno es puesta en la máquina de "Los Ángeles":



Material después de realizado el ensayo

TABLA 1.8.23 Porcentaje de Desgaste - HAM-LA PINTADA

⁶¹ FUENTE: Elaboración Propia

	GRAVA	GRAVILLA
Gradación	B	C
N° de Esferas	11	8
N° de Revoluciones	500	500
% de DESGASTE ≤ 40	29,82	26,35

TABLA 1.8.24 Porcentaje de Desgaste - SEDECA-CHARAJA

	GRAVA	GRAVILLA
Gradación	B	C
N° de Esferas	11	8
N° de Revoluciones	500	500
% de DESGASTE ≤ 40	28,96	26,78

TABLA 1.8.25 Porcentaje de Desgaste - SEDECA-TOLOMOSA

	GRAVA	GRAVILLA
Gradación	B	C
N° de Esferas	11	8
N° de Revoluciones	500	500
% de DESGASTE ≤ 40	30,09	29,05

TABLA 1.8.26 Porcentaje de Desgaste - ACV-EL MOLINO

	GRAVA	GRAVILLA
Gradación	B	C
N° de Esferas	11	8
N° de Revoluciones	500	500
% de DESGASTE ≤ 40	33,30	29,50

3.1.8. Equivalentes de Arena (ASTM D2419 – AASHTO T176 – 00)

➤ **Objetivo**

Determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo o material arcilloso, en los agregados finos.

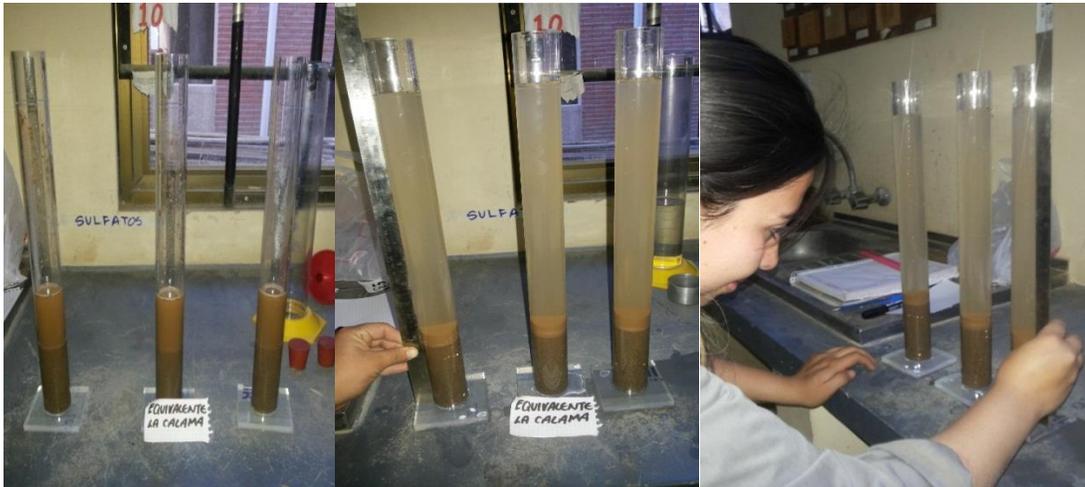
➤ **Procedimiento**

- El material para el ensayo debe ser el que pase la malla de 4.75 mm (N°4).
- Por medio del sifón se introduce la solución de floculante dentro del cilindro, hasta una altura de 10 cm (4 pulgadas).
- Se vacía dentro del cilindro el contenido de una cápsula llena de la muestra preparada del material, que contiene aproximadamente 110 gr de material suelto (como promedio).
- Transcurridos diez minutos, se sella con un tapón la probeta y se le agita vigorosamente en forma longitudinal, de un lado a otro, manteniéndose en posición horizontal. Se hace 90 ciclos en aproximadamente 30 segundos con una carrera aproximada de 20 cm (8 pulgadas). Un ciclo consiste en un movimiento completo de oscilación.
- Se quita el tapón y se empieza a introducir el tubo de irrigación, se empuja hacia los lados y abajo, después se empuja el tubo hasta tocar el fondo del cilindro.
- Una vez hecho esto, se separa el material arcilloso del arenoso, para lo que es necesario suspenderlo en la solución mediante un movimiento suave de picado con el tubo irrigador y agitando simultáneamente el cilindro.
- Cuando el nivel del líquido llegue a 37.5 cm (15 pulgadas), se sube lentamente el tubo irrigador sin cortar el chorro de manera que el líquido se mantenga en los mismos 37.5 cm mientras se saca el tubo. El chorro se regula completamente fuera y el nivel final debe ajustarse a los mismos 37.5 cm.
- Se deja la probeta en reposo absoluto durante exactamente 20 minutos.
- Se introduce lentamente el pisón lastrado dentro del cilindro, hasta que este descansa sobre la arena. Se gira la varilla ligeramente sin empujarla hacia abajo, hasta que pueda verse uno de los tornillos insertados para centrar y anotamos el nivel correspondiente de apoyo al centro del tornillo.

Procedimiento Gráfico 1.8.7 EQUIVALENTE DE ARENA⁶²



El material que pasa el tamiz N°4 es secado en el horno y posteriormente humectado.



Determinacion del % de arcilla y arena que poseen las muestras

TABLA 1.8.27 Equivalente de Arena para las Muestras Analizadas

	HAM LA PINTADA	SEDECA CHARAJA	SEDECA TOLOMOSA	ACV EL MOLINO
EQUIVALENTE DE ARENA (%) \geq 45	79,631	57,87	78,96	84,36

3.1.9. Resistencia a los Sulfatos (ASTM E88 – AASHTO T101-99)

➤ Objetivo

⁶² FUENTE: Elaboración Propia

Determinar la resistencia de los agregados pétreos a la desintegración debido a la presencia de sustancias sulfatadas.

➤ **Procedimiento**

- Se prepara la solución de sulfato de sodio con agua a temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
- La solución de sulfato de sodio debe ser enfriada a $21 \pm 1^{\circ}\text{C}$ y debe tener una densidad en el momento de usarse entre 1.511 a 1.174 (gr/cm^3).
- El material a ensayar es tamizado y se toman los pesos indicados en la siguiente tabla 3.1.20 y son colocados en recipientes separados.
- Las muestras son sumergidas en la solución de sulfatos de sodio, durante 16 horas como mínimo y 18 horas como máximo en la cual deberá haber suficiente solución para que la muestra quede totalmente sumergida durante el ciclo.
- Secar en horno a 110°C y dejar enfriar las muestras a temperatura ambiente y repetir la operación 5 CICLOS.

TABLA 1.8.28 Cantidades y Tamices a usar en ensayo de Durabilidad⁶³

AGREGADO FINO			
Tamaño de los tamices		Cantidad (gr)	Tamiz para determinar la pérdida
Pasa	Retiene		
3/8"	Nº4	100	Nº8
Nº4	Nº8	100	Nº16
Nº8	Nº16	100	Nº30
Nº16	Nº30	100	Nº50
Nº30	Nº50	100	Nº100
AGREGADO GRUESO			
Tamaño de los tamices		Cantidad (gr)	Tamiz para determinar la pérdida
Pasa	Retiene		
1"	3/4"	500 ± 30	1/2"
3/4"	1/2"	670 ± 10	3/8"
1/2"	3/8"	330 ± 5	Nº4
3/8"	Nº4	300 ± 5	Nº8

⁶³ FUENTE: Manual de ensayos de asfaltos/ABC

Procedimiento Gráfico 1.8.8 RESISTENCIA A SULFATOS⁶⁴



Se prepara la solución controlando la densidad de la misma.



Las muestras son sumergidas en la solución de sulfato de sodio



Muestras secadas después de un ciclo del ensayo de durabilidad.

⁶⁴ FUENTE: Elaboración Propia

TABLA 1.8.29 Porcentaje de Pérdida por Sulfatos en Muestras Analizadas

	HAM LA PINTADA	SEDECA CHARAJA	SEDECA TOLOMOSA	ACV EL MOLINO
%DE PERDIDA A. GRUESO \leq 12%	1,710	1,75	1,29	1,83
%DE PERDIDA A. FINO \leq 10%	1,355	1,07	1,09	1,55

3.1.10. Determinación del Porcentaje de Caras Fracturadas ASTM D5821

➤ Objetivo

Determinar el porcentaje en peso, de una muestra de agregado grueso que presente una o más caras fracturadas, para mezclas asfálticas en caliente.

➤ Procedimiento

- Tamizar el material grueso y fino completamente por la malla N°4, descartando el material que pase dicha malla.
- Espárzase el material en un área amplia, para inspeccionar cada partícula.
- Separar la partícula que tenga al menos una cara fracturada de las que no tengan ninguna cara fracturada.
- Una partícula se considera fracturada cuando un 25% o más del área o de la superficie aparece fracturada.

Procedimiento Gráfico 1.8.9 CARAS FRACTURADAS⁶⁵



Observación de las partículas fracturadas y sin fracturas

⁶⁵ FUENTE: Elaboración Propia

TABLA 1.8.30 Porcentaje de Caras Fracturadas en Muestras Analizadas

	HAM LA PINTADA	SEDECA CHARAJA	SEDECA TOLOMOSA	ACV EL MOLINO
% de CARAS FRACTURADAS \geq 75%	96,313	97,63	91,49	97,57

3.2. CONTROL DE CALIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO

3.2.1. Muestreo de Cementos Asfálticos

Para la investigación se realiza el muestreo de cementos asfálticos, en tres plantas que a continuación daremos a conocer.

- Cemento asfáltico convencional BETUNEL (HAM).



FIGURA 1.8.30 Muestreo Planta Asfáltica "La Pintada-HAM"⁶⁶

- Cemento asfáltico convencional BETUPEN (SEDECA TARIJA)

⁶⁶ FUENTE: Elaboración Propia



FIGURA 1.8.31 Muestreo Planta Asfáltica de Charaja⁶⁷

- Cemento asfáltico modificado (consorcio VIAL COPACABANA).



FIGURA 1.8.32 Muestreo Planta Asfáltica El Molino⁶⁸

⁶⁷ FUENTE: Elaboración Propia

⁶⁸ FUENTE: Elaboración Propia

3.2.2. Ensayo de Penetración (ASTM D5 – AASHTO T51-00)

➤ **Objetivo**

Medir la consistencia o dureza del cemento asfáltico, mediante la penetración de una aguja normalizada, con un peso de 100 gramos; a una temperatura de 25°C durante 5 segundos. La unidad de penetración es (1/10mm).

➤ **Procedimiento**

- Se vacía la muestra diluida en la capsula de penetración.
- La cápsula con la muestra, es colocada en baño de agua a temperatura de 25°C; durante 1 hora.
- Se coloca la muestra en el soporte del aparato de penetración, la aguja cargada con el peso especificado se ajusta de modo que haga contacto con la superficie de la muestra, colocar la lectura en cero; posteriormente se deja caer la aguja durante un periodo de 5 segundos, luego se ajusta el vástago del aparato, para leer la distancia penetrada.
- Se deben hacer por lo menos tres pruebas sobre la superficie de la muestra, que no estén a menos de 1cm de la pared del recipiente, ni a menos de 1 cm de distancia entre sí. La penetración reportada debe ser el promedio calculado aproximado a la unidad más cercana de por lo menos tres pruebas.

Procedimiento Gráfico 1.8.10 PENETRACIÓN DEL ASFALTO⁶⁹



Muestras para ensayo de penetración

⁶⁹ FUENTE: Elaboración Propia



Muestras sometidas en el penetrómetro

TABLA 1.8.31 Penetración en Muestras Asfálticas Analizadas

	UNIDAD	MUESTRA	ESPECIFICACIONES	
			Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C AASHTO T49 ASTM D5	mm	BETUNEL - HAM		
		91,00	85	100
		BETUPEN - SEDECA		
		93,00	85	100
		BETUFLEX - ACV		
		64	60	70

3.2.3. Peso Específico (ASTM D71-94 – AASHTO T229-97)

➤ Objetivo

Determinar el peso específico del cemento asfáltico, necesario para realizar el diseño Marshall.

➤ Procedimiento

- El cemento asfáltico es calentado a no más de 140°C para realizar el ensayo.

- Pesar el frasco volumétrico (PICNOMETRO + TAPA) vacíos con una precisión de 0.01gr.
- Para la calibración de los picnómetros estos son llenados con agua destilada, dejar en baño de agua a temperatura de 25°C por el lapso de 25 min y proceder a pesarlo.
- Eliminar el agua destilada de los picnómetros; introducir asfalto dos terceras partes del total del envase, dejar enfriar a temperatura ambiente por 30 minutos y proceder a su pesado.
- Llenar el picnómetro que tiene asfalto en sus dos terceras partes, proceder a llenarlo con agua destilada y dejarlo por 1 hora en baño de agua a 25°C, y proceder a su pesado.

Procedimiento Gráfico 1.8.11 PESO ESPECÍFICO ASFÁLTICO⁷⁰



Picnómetros con agua destilada para su calibración y con material



Material en baño María a 25°C y posterior pesado de la muestra.

⁷⁰ FUENTE: Elaboración Propia

TABLA 1.8.32 Peso Específico de las Muestras Asfálticas Analizadas

PESO ESPECÍFICO AASHTO T229-97 ASTM D71-94	UNIDAD	MUESTRA	ESPECIFICACIONES
	gr./cm ³		BETUNEL - HAM
		1,005	≈1,000
		BETUPEN - SEDECA	
		1,004	≈1,000
		BETUFLEX - ACV	
		1,005	≈1,000

3.2.4. Ensayo de Ductilidad (ASTM D113 – AASHTO T51-00)

➤ Objetivo

Medir la distancia en centímetros, en la cual una probeta de cemento asfáltico es alongada antes de romperse.

➤ Procedimiento

- El cemento asfáltico es calentado a una temperatura no mayor a los 140°C.
- Vaciamos la muestra en los moldes de latón, se enrasa con la espátula.
- Se coloca los moldes con la muestra al equipo con agua, debe estar a 25°C.
- Se pone en marcha el mecanismo de prueba a una velocidad de 5 cm/min y se lee la distancia alongada antes de romperse.

Procedimiento Gráfico 1.8.12 DUCTILIDAD DEL ASFALTO⁷¹



Moldes de latón con muestras de asfalto

⁷¹ FUENTE: Elaboración Propia



Ensayo en proceso en ductilímetro

TABLA 1.8.33 Ductilidad en Muestras Analizadas

	UNIDAD	MUESTRA	ESPECIFICACIONES
	DUCTILIDAD AASHTO T51 ASTM D113	cm	
114			≥ 100
BETUPEN - SEDECA			
110			≥ 100
BETUFLEX - ACV			
123			≥ 100

3.2.5. Ensayo de Punto de Inflamación y Combustión del Cemento Asfáltico mediante la Copa de Cleveland (ASTM D1310-01 – AASHTO T79-96)

➤ **Objetivo**

Medir la temperatura a la cual puede calentarse el cemento asfáltico, sin peligro de inflamarse en presencia de una llama. Se efectúa en un equipo normalizado denominado Copa de Cleveland.

➤ **Procedimiento**

- Calentar la muestra a una temperatura no mayor a 140°C.
- Llenar parcialmente la copa de Cleveland hasta la marca de aforo con cemento asfáltico y se calienta de tal modo que la velocidad de incremento de

- temperatura de la muestra sea de 14 a 17°C/min, hasta que alcance la temperatura de 60°C abajo del punto de inflamación probable.
- Reducir gradualmente el calor aplicado a la copa, de manera que al llegar la muestra a 30°C abajo del punto de inflamación probable, el incremento de temperatura sea de 5 a 6 °C por minuto.
 - Se agita una pequeña llama sobre la superficie de la muestra y la temperatura a la que se desprenden suficientes vapores para producir una inflamación instantánea, se designa como el punto de inflamación.
 - Se agita la pequeña llama de igual modo que para determinar el punto de inflamación, cuando se encienda una pequeña llama sobre el cemento asfáltico que dure unos 5 segundos encendida se anota dicha temperatura.

Procedimiento Gráfico 1.8.13 PUNTO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN⁷²



Copa de Cleveland con material Asfáltico



Ppunto de inflamación y combustión en proceso

⁷² FUENTE: Elaboración Propia

TABLA 1.8.34 Punto de Inflamación en Muestras Analizadas

PUNTO DE INFLAMACIÓN	UNIDAD	MUESTRA	ESPECIFICACIONES	
	°C	BETUNEL - HAM		Mínimo
		249		232
		BETUPEN - SEDECA		
		257		232
		BETUFLEX - ACV		
		277		232

TABLA 1.8.35 Punto de Combustión en Muestras Analizadas

PUNTO DE COMBUSTIÓN	UNIDAD	MUESTRA	ESPECIFICACIONES	
	°C	BETUNEL - HAM		Mínimo
		272		232
		BETUPEN - SEDECA		
		273		232
		BETUFLEX - ACV		
		296		232

3.2.6. Película Delgada Rotatoria (ASTM D2872 – AASHTO T240-06)**➤ Objetivo**

Simular las condiciones de endurecimiento que sufre el cemento asfáltico en operaciones de mezclado en planta.

Efectuado el ensayo se somete a ensayos de penetración, ductilidad u otros.

➤ Procedimiento

- Se toman 80 gramos de cemento asfáltico que se coloca en una plancha metálica de modo de obtener una película de 3mm de espesor y dejar enfriar a temperatura ambiente, pesamos los platillos más material asfáltico.
- Estos se colocan dentro del horno rotatorio a 163 °C, sobre un plato que gira aproximadamente de 5 a 6 rpm durante 5 horas.
- Luego se retira la muestra del horno y se registra los pesos de los platillos.

- Con el peso inicial y final, obtenemos el porcentaje de pérdida de asfalto por envejecimiento del material.
- El material retirado es sometido a ductilidad y penetración nuevamente.

Procedimiento Gráfico 1.8.14 ENSAYO DE LA PELÍCULA DELGADA⁷³



Placas metálicas con material asfáltico



Muestras en el Horno rotatorio a 163 ° C

TABLA 1.8.36 Película Delgada en Muestras Analizadas

PELÍCULA DELGADA AASHTO T240 ASTM D2872	BETUNEL - HAM			
	ENSAYO	UNIDAD	MUESTRA	ESPECIFICACIONES
	PÉRDIDA	%	0,266	≤ 1
	PENETRACIÓN	mm	56,000	≥ 50
DUCTILIDAD	cm	77,000	≥ 70	

⁷³ FUENTE: Elaboración Propia

PELÍCULA DELGADA AASHTO T240 ASTM D2872	BETUPEN - SEDECA			
	ENSAYO	UNIDAD	MUESTRA	ESPECIFICACIONES
	PÉRDIDA	%	0,399	≤ 1
	PENETRACIÓN	mm	58,000	≥ 50
	DUCTILIDAD	cm	82,000	≥ 70
	BETUFLEX - ACV			
	ENSAYO	UNIDAD	MUESTRA	ESPECIFICACIONES
	PÉRDIDA	%	0,306	≤ 1
	PENETRACIÓN	mm	64,000	≥ 50
	DUCTILIDAD	cm	83,000	≥ 70

3.2.7. Punto de Reblandecimiento (ASTM D36 – AASHTO T53-96)

➤ **Objetivo**

Determinar la temperatura, en la cual hay un cambio gradual en la consistencia del cemento asfáltico debido al incremento de temperatura.

➤ **Procedimiento**

- Se diluye el cemento asfáltico a una temperatura no mayor de 140°C.
- Vaciamos la muestra en los anillos, se enrasa con la espátula y se deja enfriar durante una hora.
- El recipiente donde se coloca los anillos con la muestra de cemento asfáltico debe ser de 700 cc. y el agua debe estar a una temperatura de 5°C.
- Se coloca la muestra en el vaso durante 15 minutos debe mantener la temperatura de 5°C.
- Transcurridos el tiempo se coloca el vaso con la muestra cargada con las esferas de acero en el mechero hasta que la muestra se dilate.

- En el momento que el asfalto y la esfera tocan el fondo del vaso se registra la temperatura del agua, esta temperatura se designa con el nombre de punto de reblandecimiento del asfalto.

Procedimiento Gráfico 1.8.15 PUNTO DE REBLANDECIMIENTO⁷⁴



Muestras en los anillos de ensayo

Muestra sometida a temperatura de 5°C



Colocado de las esferas en los anillos

Determinación del punto de ablandamiento

⁷⁴ FUENTE: Elaboración Propia

TABLA 1.8.37 Punto de Reblandecimiento en Muestras Analizadas

PUNTO DE REBLANDECIMIENTO AASHTO T53-96 ASTM D36	UNIDAD	MUESTRA	ESPECIFICACIONES
	° C		BETUNEL - HAM
		45	≥43
		BETUPEN-SEDECA	
		46	≥43
		BETUFLEX - ACV	
		53	≥43

3.2.8. Recuperación Elástica a los 25 °C (ASTM D6084-06 – AASHTO T101-99)

➤ Objetivo

Utilizado en asfaltos modificados, el ensayo se efectúa a una temperatura de 13°C ± 0.5°C y a una velocidad de 5 cm/min ±5%.

➤ Procedimiento

- Calentar la muestra a una temperatura no mayor a 140°C.
- Vaciamos la muestra en los moldes de latón.
- Se enrasa con la espátula y se deja enfriar durante 1 hora.
- Se coloca los moldes con la muestra al equipo con agua, debe estar a 25°C, se espera que transcurra entre 85 a 95min. antes de empezar el ensayo; para posteriormente las placas sean puestas en los tornillos, de igual forma que en el ensayo de ductilidad.
- Se procede a cortar la muestra a una distancia equidistante de ambos extremos, y se observa la recuperación que este alcanza después de 1 hora.
- El valor de recuperación elástica en asfaltos modificados es expresado como un porcentaje.
- La norma bajo la cual está regido el ensayo , no especifica que un asfalto debe presentar más el 80% de recuperación elástica

Procedimiento Gráfico 1.8.16 RECUPERACIÓN ELÁSTICA A 25° C⁷⁵



Moldes de Latón



Muestras sometidas a recuperación elástica

⁷⁵ FUENTE: Elaboración Propia

TABLA 1.8.38 Recuperación Elástica en Muestra Analizada

BETUFLEX - ACV			
Recuperación Elástica a los	DISTANCIA DE RETRACCIÓN (cm)	% RECUPERACIÓN	ESPECIFICACIONES
25 °C	8,1	81	≥ 80%
ASTM D6084	8,4	84	
AASHTO T101	8,2	82	
82 %			

3.3. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS METODOLOGÍA MARSHALL

La metodología Marshall solo es aplicable, a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm. (1").

3.3.1. Combinación de Agregados

Es el proceso de mezclar mecánicamente dos o más materiales ya que es prácticamente imposible encontrar un material que satisfaga todas las condiciones de granulometría necesarias en una mezcla asfáltica.

3.3.1.1. Método del diagrama rectangular.

Esta metodología es utilizada para determinar los porcentajes de material a utilizar dentro de la dosificación de una mezcla asfáltica mezclándolos materiales de tal manera que estos cumplan con la granulometría exigida, con la finalidad de satisfacer las condiciones de granulometría necesaria para cada proyecto.

3.3.2. Granulometría de los Agregados

Las granulometrías de la presente investigación están basadas en las especificaciones de la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras), lo cual indica que las granulometrías empleadas dentro del Territorio Boliviano deben estar regidas de acuerdo a la tabla 3.3.1.

Para elegir la faja bajo la cual se trabajara, se toma en cuenta el tráfico al cual estará sometido el pavimento.

Una vez elegida la faja de control granulométrico, el material a usar deberá encontrarse dentro de este rango de aceptación.

TABLA 1.8.39 Granulometría de los Agregados Especificado por Norma⁷⁶

TAMICES	GRADACION DE LOS AGREGADOS (PORCENTAJE PASANTE)			
	A	B	C	D
2"	100			
1 1/2"	97 - 100	100		
1"	-	97 - 100	100	
3/4"	66 - 80±5	-	97 - 100	100
1/2"	-	-	79 - 88±5	97 - 100
3/8"	48 - 60±6	53 - 70±6	-	-
N°4	33 - 45±5	40 - 52±6	49 - 59±5	57 - 69±6
N°8	25 - 33±4	25 - 39±4	36 - 45±5	41 - 49±6
N°40	9 - 17±3	10 - 19±3	14 - 22±3	14 - 22±3
N°200	3 - 8±2	3 - 8±2	3 - 7±2	3 - 7±2
PORCENTAJE DE ASFALTO	4,0 - 5,0	4,5 - 7,5	4,5 - 9,0	4,5 - 9,0

⁷⁶ FUENTE: Administradora Boliviana de Carreteras

TABLA 1.8.40 Porcentajes Granulométricos Planteados - HAM-LA PINTADA

Tamices	PORCENTAJES				PROPUESTO	ESPECIFICACION	
	GRAVA	GRAVILLA	ARENA	FILLER		FAJA B	
	25,95	31,46	37,10	5,49			
2 1/2"	25,95	31,46	37,10	5,49	100,00		
2"	25,95	31,46	37,10	5,49	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	25,95	31,46	37,10	5,49	100,00	100,00	100,00
1"	25,95	31,46	37,10	5,49	100,00	95,00	100,00
3/4"	17,50	31,46	37,10	5,49	91,55	80,00	100,00
1/2"	2,30	30,43	37,10	5,49	75,32		
3/8"	0,42	20,39	37,07	5,49	63,37	45,00	80,00
N°4	0,09	1,97	34,59	5,41	42,07	28,00	60,00
N°8	0,09	0,29	26,38	5,22	31,98	20,00	45,00
N°40	0,09	0,24	11,98	4,53	16,83	10,00	32,00
N°200	0,06	0,21	1,28	3,85	5,41	3,00	8,00

Grafica 1.8.5 CURVA GRANULOMÉTRICA FAJA B - HAM-LA PINTADA

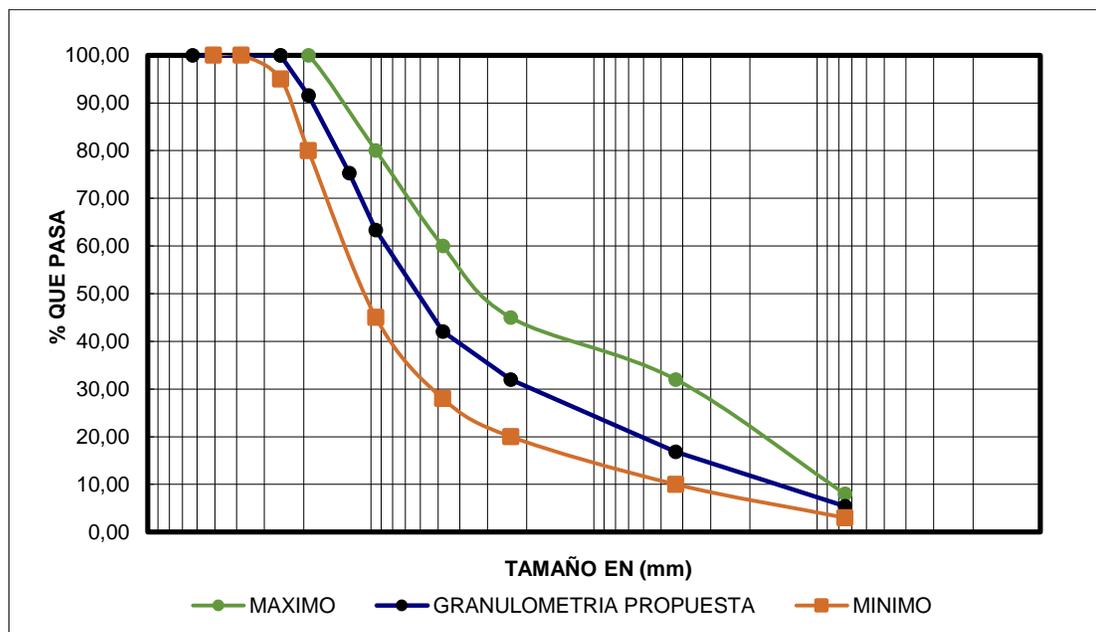
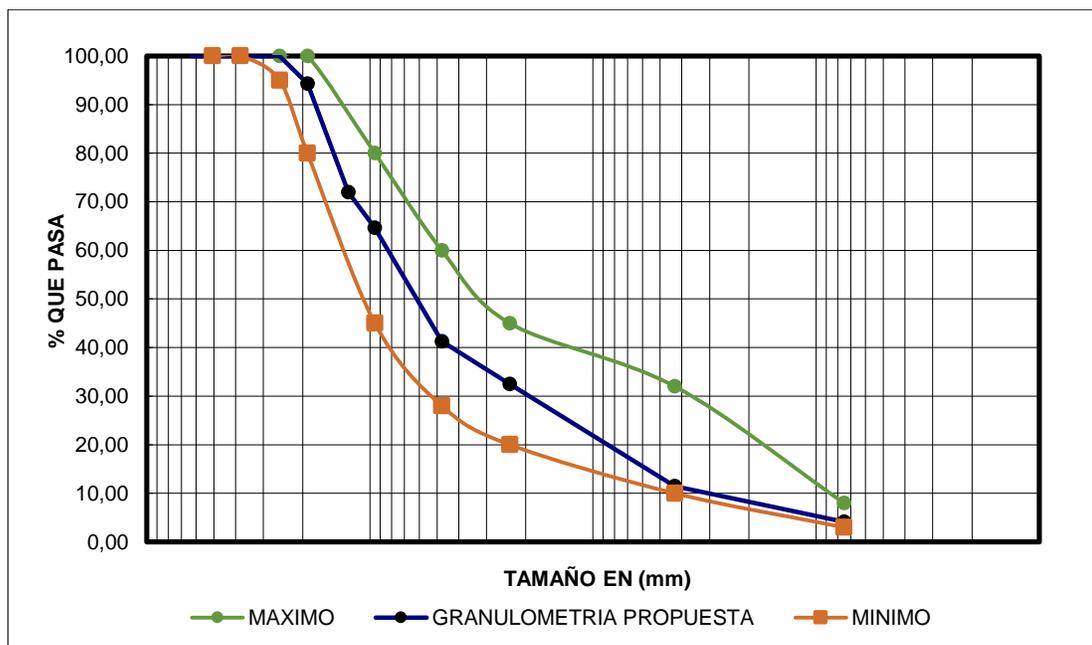


TABLA 1.8.41 Porcentajes Granulométricos Planteados - SEDECA-CHARAJA

Tamices	PORCENTAJES			PROPUESTO	ESPECIFICACION	
	GRAVA	GRAVILLA	ARENA		FAJA B	
	36,89	23,07	40,04			
2 1/2"	36,89	23,07	40,04	100,00		
2"	36,89	23,07	40,04	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	36,89	23,07	40,04	100,00	100,00	100,00
1"	36,89	23,07	40,04	100,00	95,00	100,00
3/4"	31,16	23,07	40,04	94,27	80,00	100,00
1/2"	8,85	23,06	40,04	71,95		
3/8"	2,15	22,47	40,04	64,66	45,00	80,00
N°4	0,21	1,42	39,61	41,24	28,00	60,00
N°8	0,21	0,32	31,97	32,50	20,00	45,00
N°40	0,19	0,29	11,00	11,48	10,00	32,00
N°200	0,19	0,28	3,65	4,12	3,00	8,00

Grafica 1.8.6 CURVA GRANULOMÉTRICA FAJA B - SEDECA-CHARAJA



**TABLA 1.8.42 Porcentajes Granulométricos Planteados SEDECA-
TOLOMOSA**

Tamices	PORCENTAJES				PROPUESTO	ESPECIFICACION	
	GRAVA	GRAVILLA	ARENA	FILLER		FAJA B	
	28,41	22,42	44,21	4,97			
2 1/2"	28,41	22,42	44,20	4,97	100,00		
2"	28,41	22,42	44,20	4,97	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	28,41	22,42	44,20	4,97	100,00	100,00	100,00
1"	28,27	22,42	44,20	4,97	99,86	95,00	100,00
3/4"	23,50	22,42	44,20	4,97	95,09	80,00	100,00
1/2"	8,87	22,42	44,20	4,97	80,46		
3/8"	2,62	21,79	44,05	4,97	73,43	45,00	80,00
N°4	0,18	1,10	43,65	4,91	49,84	28,00	60,00
N°8	0,17	0,15	35,83	4,75	40,90	20,00	45,00
N°40	0,15	0,07	9,75	4,15	14,13	10,00	32,00
N°200	0,13	0,06	1,68	3,55	5,42	3,00	8,00

**TABLA 1.8.43 CURVA GRANULOMÉTRICA FAJA B SEDECA-
TOLOMOSA**

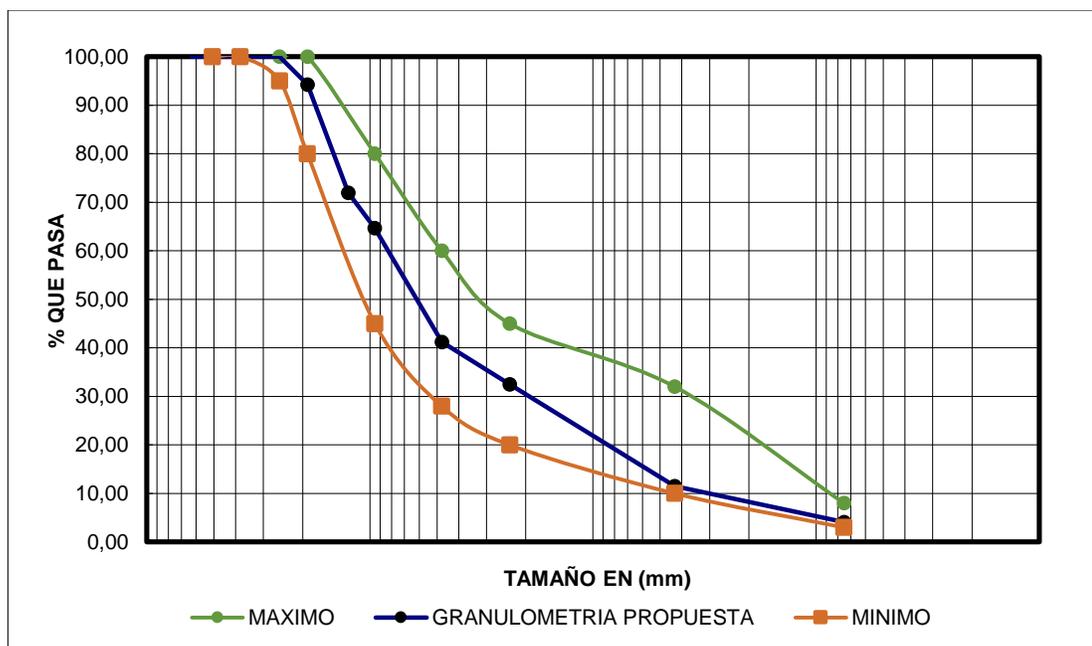


TABLA 1.8.44 Porcentajes Granulométricos Planteados - ACV-EL MOLINO

Tamices	PORCENTAJES				PROPUESTO	ESPECIFICACION	
	GRAVA	GRAVILLA	ARENA	FILLER		FAJA B	
	31,58	20,94	42,25	5,23			
2 1/2"	31,58	20,94	42,25	5,23	100,00		
2"	31,58	20,94	42,25	5,23	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	31,58	20,94	42,25	5,23	100,00	100,00	100,00
1"	31,42	20,94	42,25	5,23	99,84	95,00	100,00
3/4"	30,98	20,94	42,25	5,23	99,40	80,00	100,00
1/2"	17,50	20,92	42,25	5,23	85,90		
3/8"	7,22	20,86	42,20	5,23	75,52	45,00	80,00
N°4	0,90	2,18	38,42	5,14	46,65	28,00	60,00
N°8	0,44	0,21	33,70	4,94	39,29	20,00	45,00
N°40	0,34	0,11	16,16	4,24	20,84	10,00	32,00
N°200	0,32	0,10	1,32	3,70	5,44	3,00	8,00

- Después de la compactación se saca el plato de base y el collar del molde y se deja enfriar la probeta para su posterior extracción con una gata hidráulica.

Procedimiento Gráfico 1.8.17 ELABORACIÓN DE BRIQUETAS⁷⁷



Tamizado del material



Material preparado para cada briqueta según el % de asfalto utilizado

⁷⁷ FUENTE: Elaboración Propia



Colocado del cemento asfáltico



Preparación de la mezcla asfáltica en CALIENTE



Colocado de muestra en el molde y control de la temperatura de compactación



Compactado de la mezcla asfáltica



Briquetas de prueba para estimación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

3.3.4. Determinación de Alturas en las Briquetas

Uno de los factores necesarios para obtener los valores óptimos de diseño de una mezcla asfáltica es la determinación de alturas de los moldes cilíndricos ya compactados.



FIGURA 1.8.33 Determinación de Alturas en Briquetas⁷⁸

3.3.5. Pesos específicos en Briquetas Asfálticas

La determinación del peso específico de la mezcla asfáltica compactada en laboratorio, es de importancia en el diseño de la mezcla asfáltica para que cumpla con los parámetros de diseño; para lo cual se siguieron los siguientes pasos:

- Se obtiene el peso al aire de la briqueta asfáltica.
- Se sumerge la briqueta en agua a 25°C colgado a un hilo del cual se conoce su peso, y a la vez este hilo se encuentra unido a una balanza mecánica que permitirá saber el peso sumergido de la muestra.
- Se obtiene el peso de muestra saturada pero con superficie seca.

⁷⁸ FUENTE: Elaboración Propia

**Procedimiento Gráfico 1.8.18 PESOS ESPECÍFICOS EN BRIQUETAS
ASFÁLTICAS⁷⁹**



Peso al aire de la muestra



Peso de la muestra sumergida en agua



Peso de la muestra saturada con superficie seca

⁷⁹ FUENTE: Elaboración Propia

3.3.6. Estabilidad y Fluencia Marshall

- Cada briqueta es puesta en baño María donde el agua se encuentra a 60°C de temperatura; durante un lapso de 30 minutos.
- Posteriormente cada muestra es colocada en la prensa Marshall, para someterla a una carga que nos determina la fluencia y estabilidad de la mezcla.

Procedimiento Gráfico 1.8.19 ESTABILIDAD Y FLUENCIA⁸⁰



Briquetas en baño de agua a 60 °C



Estabilidad y fluencia en prensa Marshall

⁸⁰ FUENTE: Elaboración Propia

TABLA 1.8.46 Resultados del Diseño Marshall - HAM-LA PINTADA

	ENSAYO	% Asfalto	Valores de Diseño	RESUMEN CARACTERÍSTICAS MARSHALL	Densidad	2,29
Determinación del contenido óptimo de Asfalto, tomando en cuenta el Criterio de % de Vacíos en Mezcla y R.B.V.	Estabilidad Marshall [Lbs.]	5,74	2234,40		Estabilidad	2233,07
	Densidad [grs./cm ³]	5,74	2,29		Fluencia	12,17
	% de Vacíos en la Mezcla	5,66	3,71		Vacíos	3,71
	Relación Betumen Vacíos	5,81	77,98		R.B.V.	78,01
5,74	Promedio en %	5,74	5,74		V.A.M.	16,78

TABLA 1.8.47 Resultados del Diseño Marshall – SEDECA-CHARAJA

	ENSAYO	% Asfalto	Valores de Diseño	RESUMEN CARACTERÍSTICAS MARSHALL	Densidad	2,28
Determinación del contenido óptimo de Asfalto, tomando en cuenta el Criterio de % de Vacíos en Mezcla y R.B.V.	Estabilidad Marshall [Lbs.]	5,69	2962,75		Estabilidad	2962,75
	Densidad [grs./cm ³]	5,69	2,28		Fluencia	12,03
	% de Vacíos en la Mezcla	5,58	3,70		Vacíos	3,70
	Relación Betumen Vacíos	5,80	77,67		R.B.V.	77,67
5,69	Promedio en %	5,69	5,69		V.A.M.	16,59

TABLA 1.8.48 Resultados del Diseño Marshall – SEDECA-TOLOMOSA

	ENSAYO	% Asfalto	Valores de Diseño	RESUMEN CARACTERÍSTICAS MARSHALL	Densidad	2,33
Determinación del contenido óptimo de Asfalto, tomando en cuenta el Criterio de % de Vacíos en Mezcla y R.B.V.	Estabilidad Marshall [Lbs.]	5,51	2519,36		Estabilidad	2519,36
	Densidad [grs./cm ³]	5,51	2,33		Fluencia	11,57
	% de Vacíos en la Mezcla	5,42	3,59		Vacíos	3,59
	Relación Betumen Vacíos	5,60	78,17		R.B.V.	78,17
5,51	Promedio en %	5,51	5,51		V.A.M.	16,35

TABLA 1.8.49 Resultados del Diseño Marshall - ACV-EL MOLINO

	ENSAYO	% Asfalto	Valores de Diseño	RESUMEN CARACTERÍSTICAS MARSHALL	Densidad	2,31
Determinación del contenido óptimo de Asfalto, tomando en cuenta el Criterio de % de Vacíos en Mezcla y R.B.V.	Estabilidad Marshall [Lbs.]	5,99	3463,85		Estabilidad	3463,85
	Densidad [grs./cm ³]	5,99	2,31		Fluencia	12,94
	% de Vacíos en la Mezcla	5,93	3,55		Vacíos	3,55
	Relación Betumen Vacíos	6,04	79,23		R.B.V.	79,23
5,99	Promedio en %	5,99	5,99		V.A.M.	17,29

3.4. ANÁLISIS DE TOMOGRAFÍAS COMPUTARIZADAS DE RAYOS-X (TC-RX)

Una vez determinado el porcentaje óptimo de asfalto para las mezclas asfálticas analizadas se procede a realizar el compactado de briquetas con dicho porcentaje de cemento asfáltico, así mismo se procede a la extracción de núcleos asfálticos.

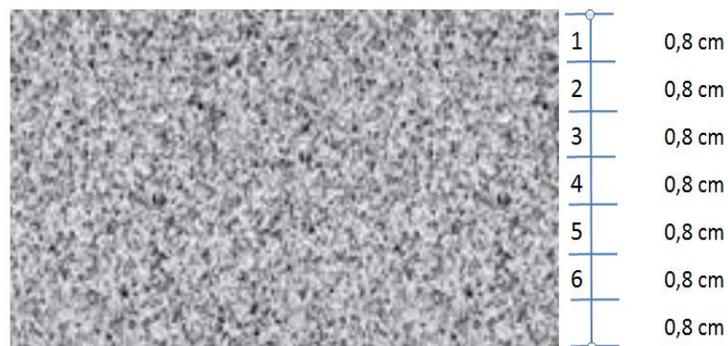
El análisis por TC-RX está basado en la aplicación de Rayos -X a masa asfáltica compactada, a partir de la cual se extraerán imágenes bidimensionales monocromáticas.

Entendiéndose como imagen monocromática a las imágenes pixeladas en escala de grises, ya que cada pixel guarda en sí un código que varía de 0 (color negro) a 255 (color blanco).

El tomógrafo por defecto nos proporciona imágenes en programa RadiAnd formato DICOM 3.0 (Efilm Lite) para el análisis de vacíos y contacto agregado se procederá a la importación de las imágenes al software de análisis de imágenes denominado IMAGE-J.

Por tratarse de mezclas asfálticas compactadas con agregado cuyo tamaño máximo de agregado es de $\frac{3}{4}$ " (19.05 mm) se toma la decisión de adquirir:

- ❖ Para briquetas compactadas en laboratorio se realizará la extracción de 6 imágenes cada 0.8 cm por molde analizado para realizar una validación de datos.



- ❖ Para núcleos se realizó la extracción de 10 imágenes cada 0.5 cm. por molde analizado para poder realizar una validación de los datos obtenidos



Una vez obtenidas las imágenes tomográficas, éstas son importadas al programa de análisis de imágenes para determinar las características de las mezclas asfálticas a partir del análisis de imágenes

Procedimiento Gráfico 1.8.20 ANÁLISIS TOMOGRÁFICO⁸¹



Colocado de muestra en el tomógrafo computarizado Helicoidal, para la obtención de imágenes monocromáticas

⁸¹ FUENTE: Elaboración Propia



Colocado de nucleos para extraccion de imagenes

Se importan las imágenes de RadiAnd DICOM al programa de análisis de imágenes bidimensionales a detalle, denominado IMAGE-J basado en programación JAVA

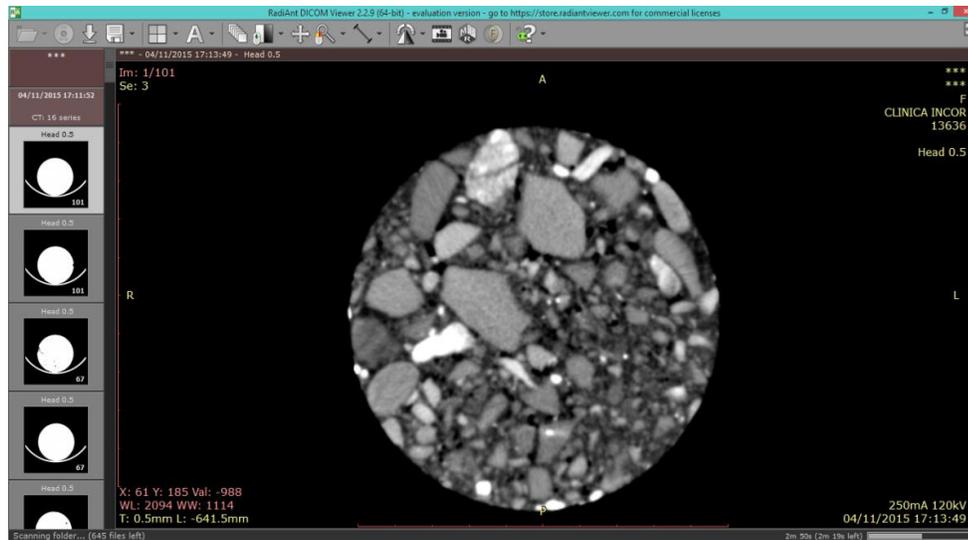


FIGURA 1.8.34 Estructura Interna de una Mezcla Asfáltica a partir de RadiAnd DICOM (TOMOGRAFIA)⁸²

Una vez importada la imagen el Software IMAGE-J éste la transforma en una imagen codificada, según la composición de sus pixeles.

⁸² FUENTE: Elaboración Propia

En base a la dimensión de la muestra analizada, el programa nos permite determinar que para el área real de nuestra probeta de 8107,32 mm² se determina un total de 64696.

Por lo que el área de un pixel es de 0.1253 mm² y un contenido de 7,9799 pixeles/mm²., el área en el que se encuentra contenida a muestra tiene una resolución de 512 x 512 pixeles.

El programa caracteriza cada pixel por la densidad del componente observado a simple vista el programa por defecto determina el código de 0 a pixeles cuyo valor numérico es 0 y aumenta hasta 255 de acuerdo a objeto que ocupa su espacio.

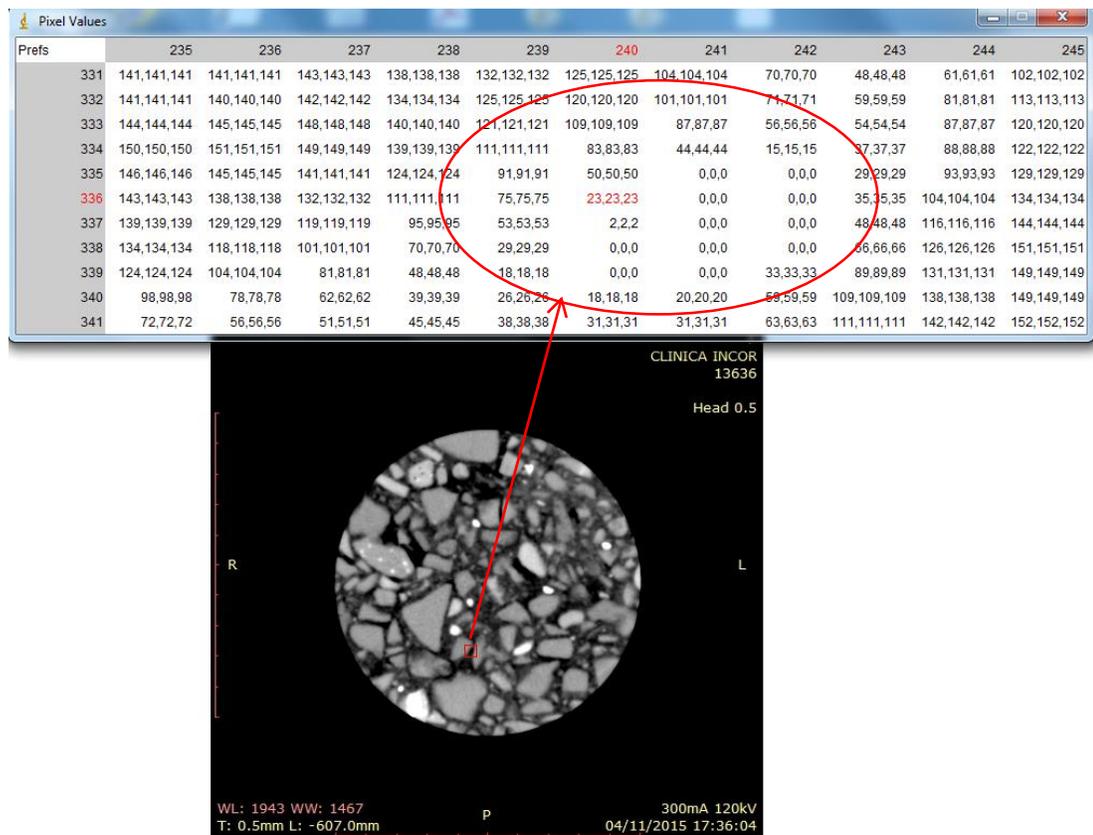


FIGURA 1.8.35 Observación del Valor de Pixeles⁸³

⁸³ FUENTE: Elaboración Propia

3.4.1. Análisis de Vacíos

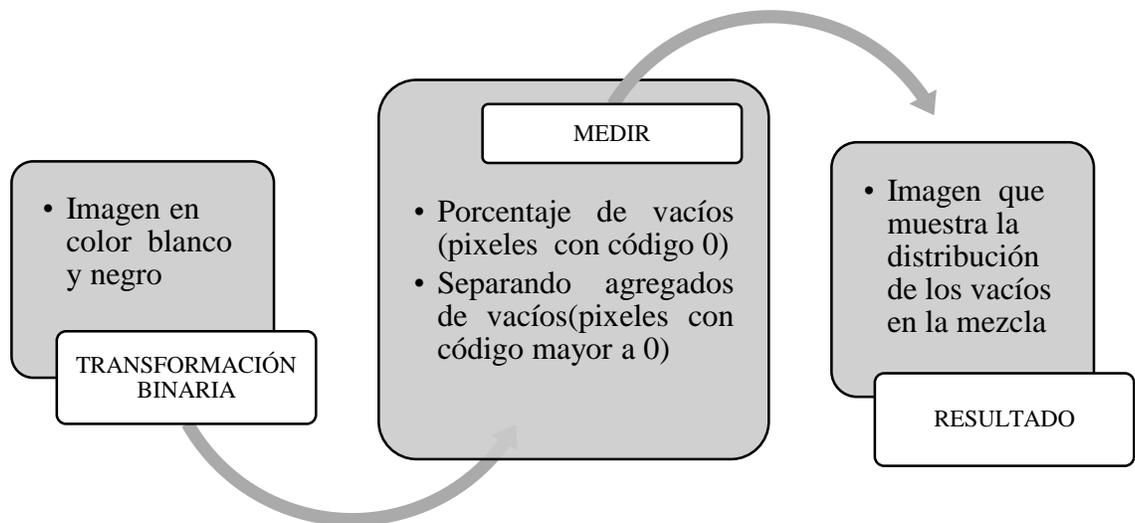
Para el análisis de vacíos se procede a importar la imagen computarizada RadiAnd DICOM al software IMAGE-J el cual la analizará como una imagen binaria.

Entendiéndose por imagen binaria a la imagen que mantendrá solo dos códigos en su matriz de colores de pixeles 0 (identificado por el color negro, VACIOS) y 255 (identificado por el color blanco, AGREGADOS DE LA MEZCLA); imagen en blanco y negro⁸⁴.

La transformación de una imagen monocromática (imagen en escala de grises) a una imagen binaria (imagen en blanco y negro).

El programa debido a que el aire es el elemento más liviano dentro de todos los agregados que compone la mezcla asfáltica procede a darle al pixel que es ocupado por aire un código cuyo valor es 0, y al resto de los agregados más densos se procede a darle un valor de 255.

El programa procede a contar el número de pixeles vacíos (pixeles con valor 0), conociendo el área de la muestra en unidades métricas podemos establecer el área de un pixel en unidades métricas debido a que el programa permite ser calibrado y determinar áreas en pixeles y porcentajes.



⁸⁴ (0-255) Escala de colores manejada según programa de imageneología

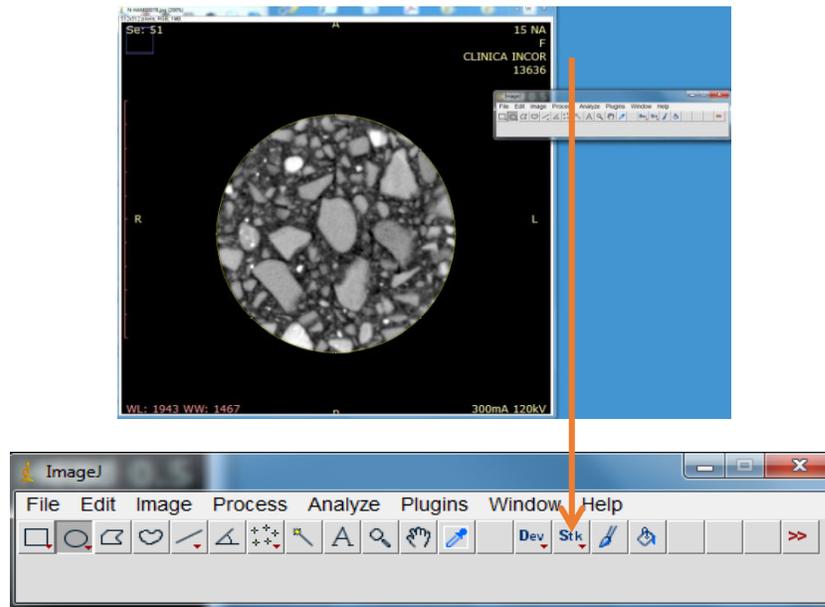


FIGURA 1.8.36 Imagen Importada a IMAGE-J⁸⁵

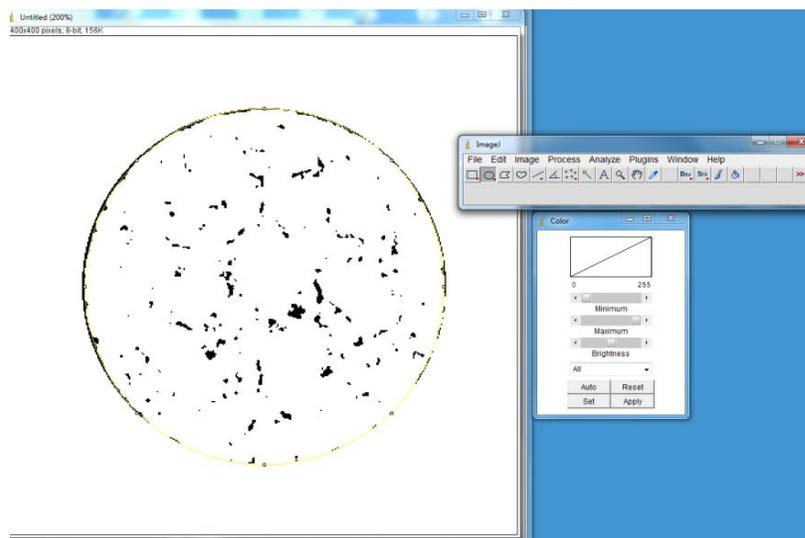


FIGURA 1.8.37 Imagen Binaria de Vacíos⁸⁶

⁸⁵ FUENTE : Elaboración Propia

⁸⁶ FUENTE: Elaboración Propia

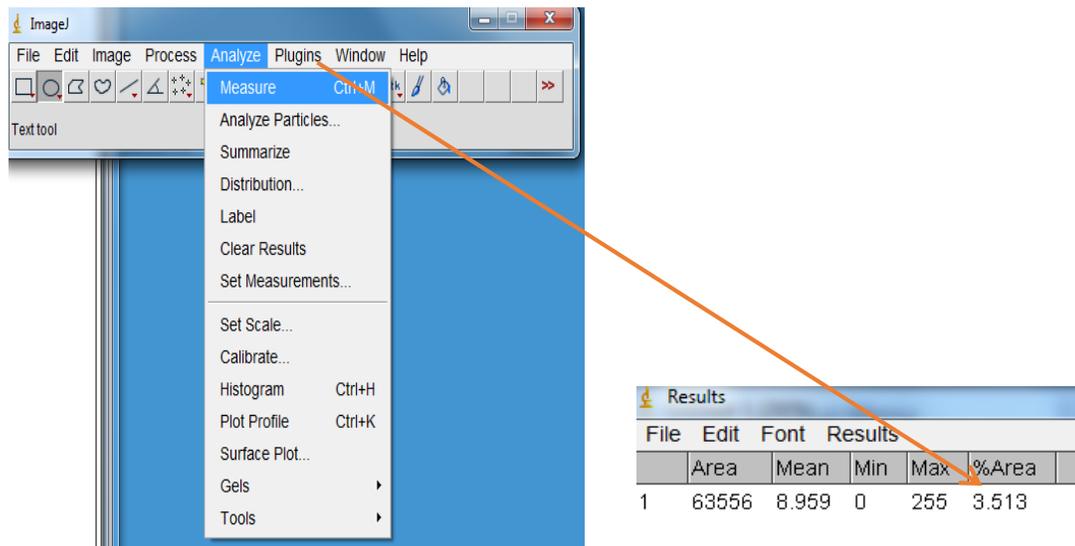


FIGURA 1.8.38 Determinación de Área de Vacíos en Porcentaje⁸⁷

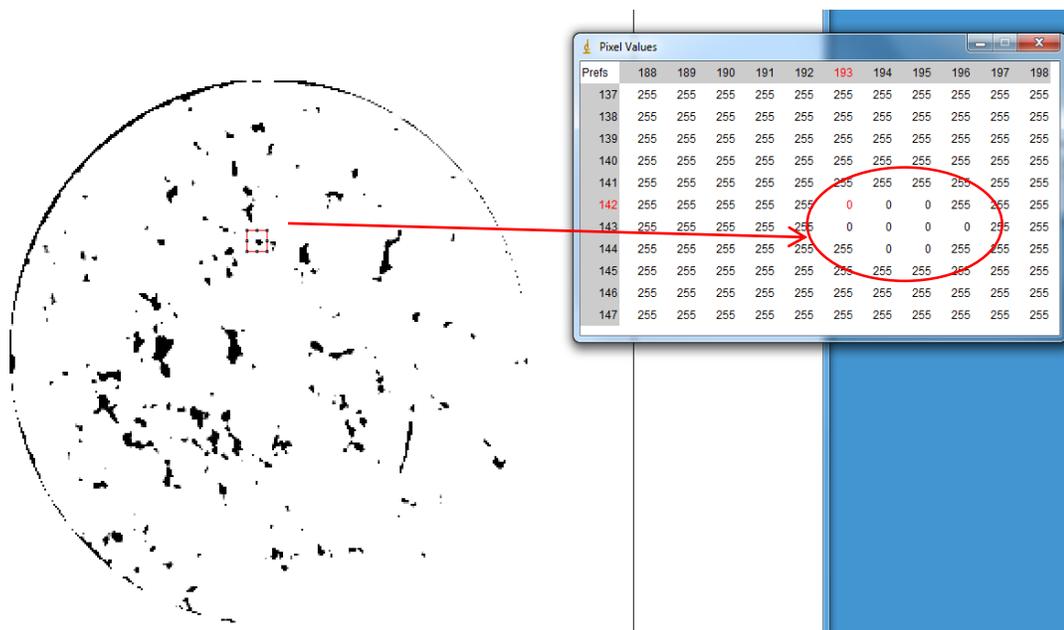


FIGURA 1.8.39 Vacíos en Programación Binaria⁸⁸

⁸⁷ FUENTE: Elaboración Propia

⁸⁸ FUENTE: Elaboración Propia

**TABLA 1.8.50 Resultados del Análisis de Vacíos por Tomografía en Briquetas
HAM- LAPINTADA**

% CA ÓPTIMO	5,74
% VACÍOS MARSHALL	3,71
Área de Pixel:	0,125 mm ²
Área de Briqueta:	8107,320 mm ²
pixeles/mm²	7,980

Nº DE BRIQUETA	Nº DE PIXELES	AREA (mm²)	% VACÍOS VALORES MEDIOS	Nº PIXELES LLENOS	Nº PIXELES VACIOS
1	64692	8106,818	3,617	62352	2340
2	64697	8107,445	3,751	62271	2426
3	64693	8106,944	4,048	62074	2619
4	64663	8103,184	3,997	62078	2585
5	64664	8103,310	4,072	62031	2633
6	64696	8107,320	4,443	61822	2874
7	64670	8104,061	4,567	61717	2953
8	64688	8106,317	4,606	61709	2979
9	64670	8104,061	4,728	61612	3058
10	64685	8105,941	3,445	62456	2229
11	64680	8105,315	3,046	62710	1970
12	64692	8106,818	3,160	62648	2044
13	64702	8108,072	3,190	62638	2064
14	64641	8100,427	3,279	62522	2119
15	64666	8103,560	4,465	61779	2887
16	64685	8105,941	3,110	62674	2011
17	64670	8104,061	3,977	62098	2572
18	64685	8105,941	4,467	61795	2890
19	64659	8102,683	3,320	62512	2147
20	64664	8103,310	3,368	62486	2178
21	64685	8105,941	3,900	62163	2522
22	64688	8106,317	3,261	62579	2109
23	64665	8103,435	3,335	62509	2156
24	64680	8105,315	4,019	62080	2600
25	64687	8106,192	4,367	61862	2825
Media =			3,822		
Desviación Estándar =			0,546		

TABLA 1.8.51 Resultados del Análisis de Vacíos por Tomografía en Briquetas SEDECA-CHARAJA

% C.A. ÓPTIMO	5,69
% Vacíos Marshall	3,7
Área de Pixel:	0,12531 mm ²
Área de Briqueta:	8107,32 mm ²
pixeles/mm²	7,97995

Nº DE BRIQUETA	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	% VACÍOS VALORES MEDIOS	Nº PÍXELES LLENOS	Nº PÍXELES VACIOS
1	64685	8105,941	3,113	62671	2014
2	64659	8102,683	3,311	62518	2141
3	63898	8007,319	3,303	61788	2110
4	64682	8105,565	4,055	62059	2623
5	64681	8105,440	4,031	62074	2607
6	64647	8101,179	4,555	61702	2945
7	64670	8104,061	4,622	61681	2989
8	64689	8106,442	3,387	62498	2191
9	63875	8004,437	3,352	61734	2141
10	64694	8107,069	3,553	62396	2298
11	64652	8101,806	3,516	62379	2273
12	64651	8101,681	4,499	61743	2908
13	64658	8102,558	4,588	61692	2966
14	64639	8100,177	4,279	61873	2766
15	64682	8105,565	3,992	62100	2582
16	64493	8081,881	4,163	61808	2685
17	64689	8106,442	3,452	62456	2233
18	64673	8104,437	3,242	62576	2097
19	64671	8104,187	4,230	61935	2736
20	64659	8102,683	3,323	62510	2149
21	64704	8108,322	3,544	62411	2293
22	64689	8106,442	4,583	61724	2965
23	64696	8107,320	4,332	61893	2803
24	64683	8105,691	4,405	61833	2850
25	64712	8109,325	4,273	61947	2765
26	64640	8100,302	3,883	62130	2510
Media =			3,907		
Desviación Estándar =			0,508		

TABLA 1.8.52 Resultados del Análisis de Vacíos por Tomografía en Briquetas SEDECA-TOLOMOSA

% C.A. ÓPTIMO	5,51
% Vacíos Marshall	3,59
Área de Pixel:	0,1253 mm ²
Área de Briqueta:	8107,320 mm ²
pixeles/mm²	7,9799

Nº DE BRIQUETA	Nº DE PÍXELES	AREA (mm²)	% VACÍOS VALORES MEDIOS	Nº PÍXELES LLENOS	Nº PÍXELES VACIOS
1	64678	8105,064	3,116	62663	2015
2	64689	8106,442	3,633	62339	2350
3	64694	8107,069	3,312	62551	2143
4	64655	8102,182	3,680	62276	2379
5	64686	8106,067	3,639	62332	2354
6	64667	8103,686	3,819	62198	2469
7	64687	8106,192	4,383	61852	2835
8	64691	8106,693	3,422	62477	2214
9	64681	8105,440	3,085	62685	1996
10	64689	8106,442	3,866	62188	2501
11	64694	8107,069	3,376	62510	2184
12	64694	8107,069	4,012	62099	2595
13	64689	8106,442	3,617	62349	2340
14	64695	8107,194	3,913	62164	2531
15	64689	8106,442	4,610	61707	2982
16	64686	8106,067	4,243	61941	2745
17	64699	8107,696	3,501	62434	2265
18	64691	8106,693	4,129	62020	2671
19	64694	8107,069	4,087	62050	2644
20	64691	8106,693	3,813	62225	2466
21	64678	8105,064	3,591	62355	2323
22	64685	8105,941	3,765	62249	2436
23	64662	8103,059	3,628	62316	2346
24	64667	8103,686	3,374	62485	2182
25	64679	8105,189	3,111	62667	2012
26	64689	8106,442	3,672	62313	2376
27	64687	8106,192	3,150	62650	2037
28	64695	8107,194	3,386	62505	2190
29	64667	8103,686	3,849	62178	2489
Media =			3,682		
Desviación Estándar =			0,383		

**TABLA 1.8.53 Resultados del Análisis de Vacíos por Tomografía en Briquetas
ACV-EL MOLINO**

% C.A. ÓPTIMO	5,99
% Vacíos Marshall	3,55
Área de Pixel:	0,12531408 mm ²
Área de Briqueta:	8107,31967 mm ²
pixeles/mm²	7,97994931

Nº DE BRIQUETA	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	% VACÍOS VALORES MEDIOS	Nº PÍXELES LLENOS	Nº PÍXELES VACIOS
1	64682	8105,565	3,545	62389	2293
2	64688	8106,317	3,193	62622	2066
3	64689	8106,442	3,499	62425	2264
4	64693	8106,944	3,822	62220	2473
5	64683	8105,691	4,556	61736	2947
6	64677	8104,939	4,398	61832	2845
7	64678	8105,064	4,654	61668	3010
8	64692	8106,818	4,373	61863	2829
9	64693	8106,944	3,077	62702	1991
10	64695	8107,194	3,618	62355	2340
11	64672	8104,312	3,067	62689	1983
12	64679	8105,189	3,644	62322	2357
13	64686	8106,067	3,678	62307	2379
14	64675	8104,688	3,021	62721	1954
15	64691	8106,693	3,215	62611	2080
16	64687	8106,192	3,445	62458	2229
17	64693	8106,944	3,541	62402	2291
18	64693	8106,944	3,390	62500	2193
19	64693	8106,944	3,056	62716	1977
20	64687	8106,192	3,078	62696	1991
21	64692	8106,818	3,094	62690	2002
22	64693	8106,944	3,971	62124	2569
23	64671	8104,187	3,870	62168	2503
24	64693	8106,944	4,585	61727	2966
25	64672	8104,312	4,624	61681	2991
Media =			3,681		
Desviación Estándar =			0,559		

Se analizó núcleos, para verificar el control que se puede realizar con TC-RX determinando un rango admisible para la variable admisible

TABLA 1.8.54 Resultados del Análisis de Vacíos en Núcleos HAM-LA PINTADA

Recuento	5,000
MEDIA	3,423
Desviación Estándar	0,946
Coefficiente de Variación	0,276
Mínimo	2,264
Máximo	4,655

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN

$$\overline{\%VACIOS} \pm \text{DESVIACIÓN ESTÁNDAR}$$

RANGO: 2,477 < **% VACIOS** > 4,369

DATOS DEPURADOS

% VACÍOS (VALORES DEPURADOS)	2,264
	4,655

TABLA 1.8.55 Resultados del Análisis de Vacíos en Núcleos SEDECA-CHARAJA

Recuento	5
Promedio	3,070
Desviación Estándar	0,391
Coefficiente de Variación	0,127
Mínimo	2,424
Máximo	3,484

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN

$$\overline{\%VACIOS} \pm \text{DESVIACIÓN ESTÁNDAR}$$

RANGO: 2,679 < **% VACIOS** > 3,460

DATOS DEPURADOS

% VACÍOS (VALORES DEPURADOS)	2,424
	3,484

TABLA 1.8.56 Resultados del Análisis de Vacíos en Núcleos SEDECA-TOLOMOSA

Recuento	5,000
Promedio	3,513
Desviación Estándar	0,931
Coefficiente de Variación	0,265
Mínimo	2,449
Máximo	4,868

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN

$\overline{\%VACIOS} \pm \text{DESVIACIÓN ESTÁNDAR}$

RANGO: 2,582 < **% VACIOS** > 4,444

DATOS DEPURADOS

% VACÍOS (VALORES DEPURADOS)	2,449
	4,868

TABLA 1.8.57 Resultado del Análisis de Vacíos en Núcleos ACV-EL MOLINO

Resumen Estadístico para %VACIOS (EL MOLINO- NUCLEOS)

Recuento	5
Promedio	4,196
Desviación Estándar	0,520
Coefficiente de Variación	0,124
Mínimo	3,785
Máximo	5,093

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN

$\overline{\%VACIOS} \pm \text{DESVIACIÓN ESTÁNDAR}$

RANGO: 3,676 < **% VACIOS** > 4,716

DATOS DEPURADOS

% VACÍOS (VALORES DEPURADOS)	5,093
------------------------------	-------

3.4.2. Análisis del Porcentaje de Vacíos del Agregado Mineral

De igual modo que en el porcentaje de vacíos, la determinación del porcentaje VAM se realiza mediante la lectura binaria (imágenes en blanco y negro) de las imágenes tomografías.

En base al procesamiento de las imágenes en programación binaria, habiendo realizado el análisis de cada imagen del contraste que éstas presentaron en su matriz de color se determinó que el valor de programación para el conteo de pixeles que se encuentran representando a los vacíos del agregado mineral (vacíos y vacíos llenos de asfalto) es 54 (denominado valor límite VAM) y 255 (AGREGADO), debido a la variación de la densidad por la presencia de asfalto.

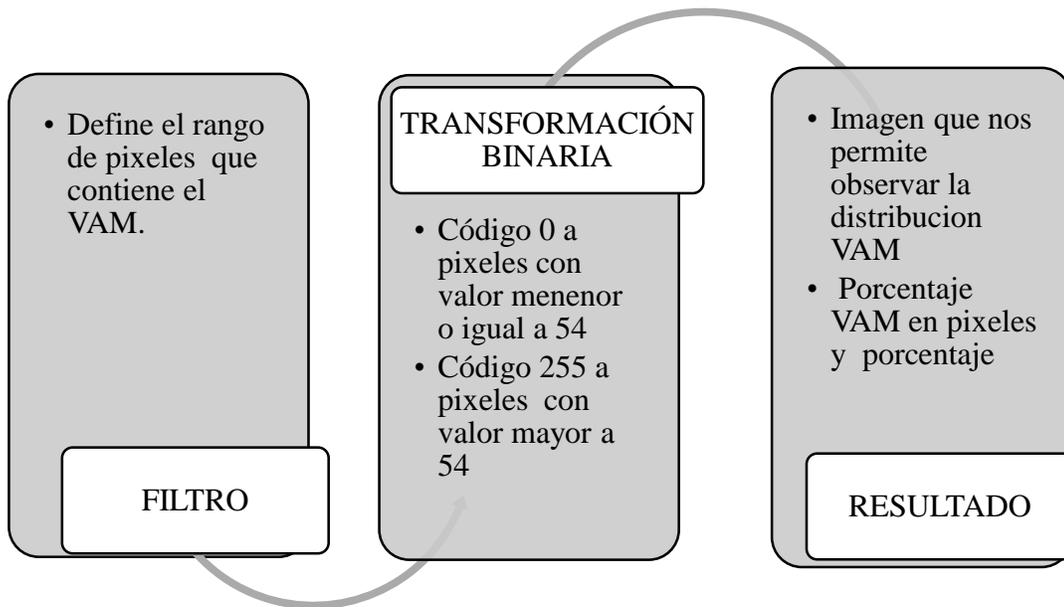
El valor de 54 se encuentra del rango aceptable recomendado por el autor del método de análisis por tomografía, el cual determina que se debe realizar un análisis por cada imagen obtenida y realizar una variación del contraste para así determinar en qué valor numérico de pixel se encuentra definido los vacíos llenos por asfalto.

Análisis que inicia con la delimitación a grandes rasgos de los vacíos mediante la aplicación de un filtro que nos permite delimitar momentáneamente los vacíos del agregado mineral para que así se realice un análisis de los códigos que los contienen.

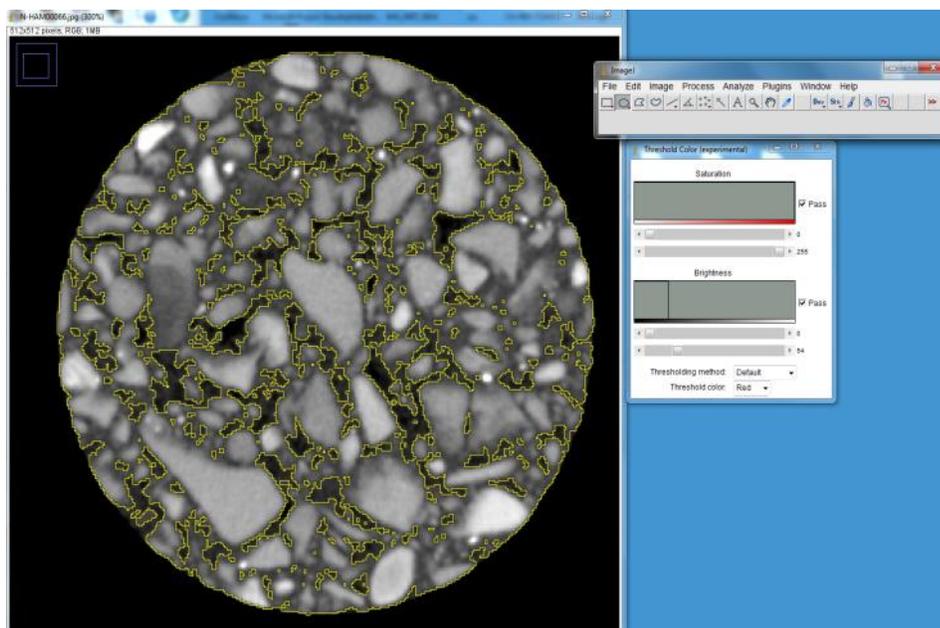
Los pixeles cuyos códigos sean menores o iguales a 54 serán transformados a códigos 0 (color NEGRO) y aquellos pixeles mayores a 54 serán transformados a códigos 255 (color BLANCO), es así que se obtiene la imagen binaria.

Pero para este caso el programa debido al cambio en la programación de valores nos determinará la Relación Betumen Vacíos (RBV), y mediante la siguiente fórmula determinamos el % VAM.

$$VAM(\%) = \frac{Vacios}{1 - RBV} * 1$$



Gráfica 1.8.7 Determinación del Rango de Valores Admisibles para el Análisis VAM⁸⁹



⁸⁹ FUENTE: Elaboración Propia

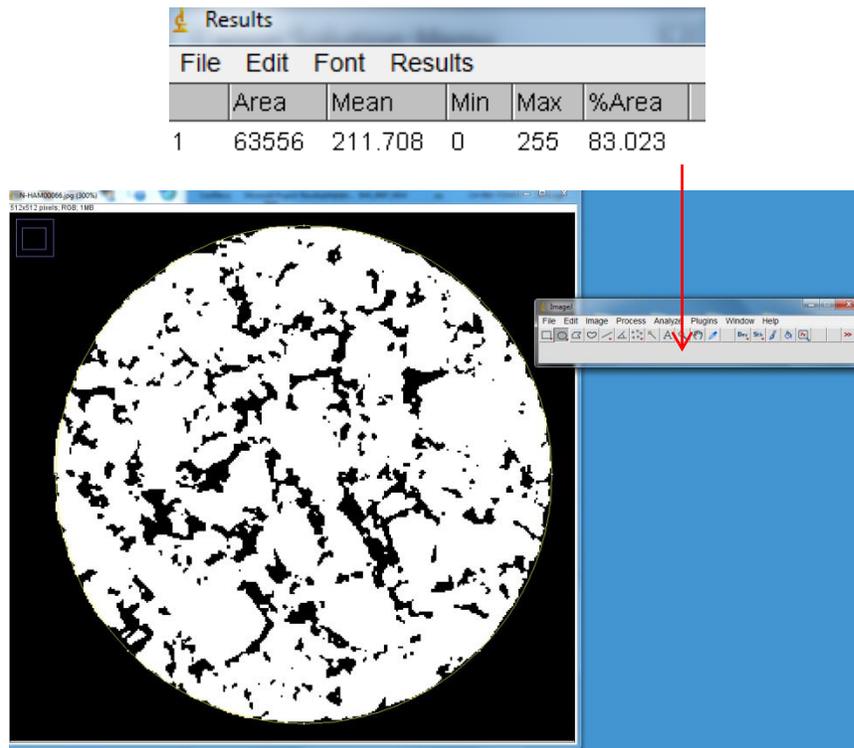
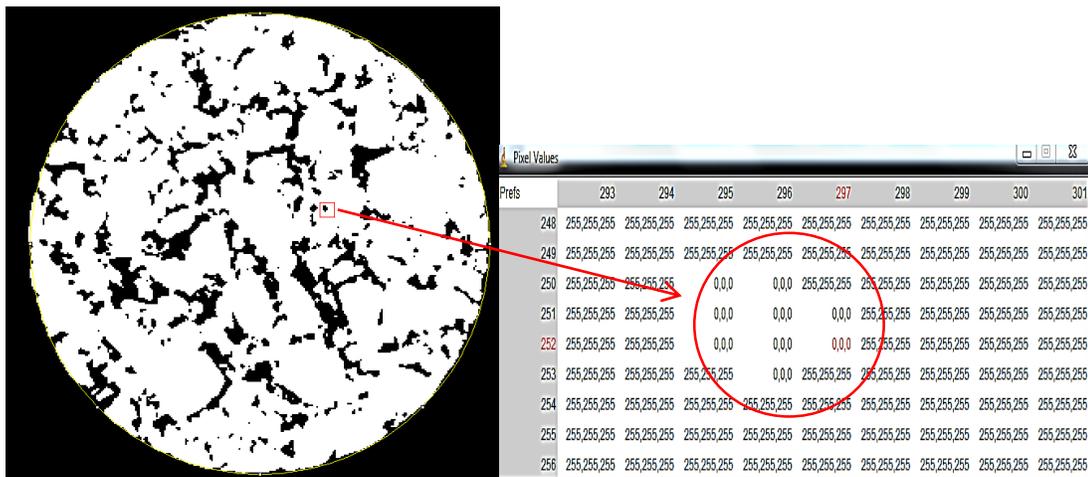
Gráfica 1.8.8 Aplicación del Filtro Binario y Obtención del %RBV⁹⁰Gráfica 1.8.9 Contenido VAM en Código Binario⁹¹⁹⁰ FUENTE: Elaboración Propia⁹¹ FUENTE: Elaboración Propia

TABLA 1.8.58 Resultado Análisis VAM de Briquetas HAM- LA PINTADA

Procedencia de los Agregados:	<i>San Mateo</i>
Tipo de Cemento Asfáltico:	<i>BETUNEL</i>
% CA óptimo	5,74
% VAM Marshall	16,78
Área de Pixel:	0,12531 <i>mm</i> ²
Área de Briqueta:	8107,32 <i>mm</i> ²
pixeles/mm²	7,97995

Nº DE BRIQUETA	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	% VAM VALORES MEDIOS	Nº PÍXELES LLENOS	Nº PÍXELES VACÍOS
1	64692	8106,818	17,435	53413	11279
2	64697	8107,445	17,781	53193	11504
3	64693	8106,944	18,914	52457	12236
4	64663	8103,184	18,449	52733	11930
5	64664	8103,310	18,355	52795	11869
6	64696	8107,320	18,812	52526	12170
7	64670	8104,061	19,055	52347	12323
8	64688	8106,317	19,770	51899	12789
9	64695	8107,194	16,972	53715	10980
10	64670	8104,061	20,040	51710	12960
11	64685	8105,941	17,247	53529	11156
12	64680	8105,315	16,854	53779	10901
13	64666	8103,560	16,541	53970	10696
14	64655	8102,182	16,932	53708	10947
15	64680	8105,315	16,663	53902	10778
16	64686	8106,067	17,878	53121	11565
17	64692	8106,818	17,204	53562	11130
18	64702	8108,072	17,510	53373	11329
19	64641	8100,427	17,381	53406	11235
20	64685	8105,941	17,127	53606	11079
21	64670	8104,061	18,480	52719	11951
22	64685	8105,941	19,271	52220	12465
23	64659	8102,683	17,483	53354	11305
24	64664	8103,310	17,638	53258	11406
25	64685	8105,941	18,179	52926	11759
26	64688	8106,317	17,248	53530	11158
27	64665	8103,435	17,058	53634	11031
28	64680	8105,315	18,340	52817	11863
29	64687	8106,192	19,433	52116	12571
Media =			17,933		
Desviación Estándar =			0,971		

**TABLA 1.8.59 Resultados Análisis VAM de Briquetas
SEDECA-CHARAJA**

Procedencia de los Agregados: CAMACHO
Tipo de Cemento Asfáltico: BETUPEN
% CA óptimo 5,69
% VAM Marshall 16,59
Área de Pixel: 0,12531 mm²
Área de Briqueta: 8107,32 mm²
pixeles/mm² 7,97995

Nº DE BRIQUETA	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	% VAM VALORES MEDIOS	Nº PÍXELES LLENOS	Nº PÍXELES VACÍOS
1	64685	8105,941	14,078	55579	9106
2	64659	8102,683	15,672	54526	10133
3	63898	8007,319	14,997	54315	9583
4	64682	8105,565	18,207	52905	11777
5	64681	8105,440	17,764	53191	11490
6	64647	8101,179	20,077	51668	12979
7	64670	8104,061	20,340	51516	13154
8	63893	8006,692	19,988	51122	12771
9	64694	8107,069	20,589	51374	13320
10	64684	8105,816	21,134	51014	13670
11	64689	8106,442	14,697	55181	9508
12	63875	8004,437	15,470	53993	9882
13	64694	8107,069	16,012	54335	10359
14	64652	8101,806	16,009	54302	10350
15	64651	8101,681	20,978	51088	13563
16	64658	8102,558	21,293	50890	13768
17	64639	8100,177	19,646	51940	12699
18	64682	8105,565	18,636	52628	12054
19	64493	8081,881	18,933	52283	12210
20	64689	8106,442	16,192	54215	10474
21	64673	8104,437	14,426	55344	9329
22	64671	8104,187	19,258	52216	12455
23	64659	8102,683	14,571	55238	9421
24	64704	8108,322	16,371	54111	10593
25	64689	8106,442	20,130	51667	13022
26	64696	8107,320	19,594	52019	12677
27	64683	8105,691	19,360	52160	12523
28	64712	8109,325	20,004	51767	12945
29	64640	8100,302	18,455	52711	11929
Media =			18,030		
Desviación Estándar =			2,347		

**TABLA 1.8.60 Resultado del Análisis VAM de Briquetas
SEDECA-TOLOMOSA**

Procedencia de los Agregados: *TOLOMOSA*
Tipo de Cemento Asfáltico: *BETUPEN*
% CA óptimo 5,51
% VAM Marshall 16,35
Área de Pixel: 0,12531 *mm*²
Área de Briqueta: 8107,32 *mm*²
pixeles/mm² 7,97995

Nº DE BRIQUETA	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	% VACIOS VALORES MEDIOS	Nº PÍXELES LLENOS	Nº PÍXELES VACÍOS
1	64678	8105,064	14,726	55153	9525
2	64689	8106,442	18,207	52911	11778
3	64694	8107,069	15,315	54786	9908
4	64655	8102,182	18,066	52975	11680
5	64686	8106,067	17,858	53134	11552
6	64667	8103,686	18,391	52774	11893
7	64687	8106,192	20,216	51610	13077
8	64691	8106,693	16,767	53844	10847
9	64681	8105,440	14,972	54997	9684
10	64689	8106,442	19,564	52033	12656
11	64694	8107,069	16,071	54297	10397
12	64694	8107,069	19,470	52098	12596
13	64689	8106,442	18,194	52919	11770
14	64695	8107,194	19,117	52327	12368
15	64689	8106,442	21,244	50947	13742
16	64686	8106,067	20,192	51625	13061
17	64699	8107,696	16,017	54336	10363
18	64691	8106,693	19,793	51887	12804
19	64694	8107,069	19,545	52050	12644
20	64691	8106,693	18,466	52745	11946
21	64678	8105,064	17,315	53479	11199
22	64685	8105,941	18,205	52909	11776
23	64662	8103,059	17,505	53343	11319
24	64667	8103,686	16,487	54005	10662
25	64679	8105,189	15,310	54777	9902
26	64689	8106,442	17,615	53294	11395
27	64687	8106,192	15,254	54820	9867
28	64695	8107,194	16,267	54171	10524
29	64667	8103,686	18,262	52858	11809
Media =			17,738		
Desviación Estándar =			1,768		

**TABLA 1.8.61 Resultados del Análisis de Briquetas
VAM ACV-EL MOLINO**

Procedencia de los Agregados: *ZONA ALTA*
 Tipo de Cemento Asfáltico: *BETUPEN*
 % C.A. óptimo 5,99
 % VAM MARSHALL 17,29
 Área de Pixel: 0,13 *mm*²
 Área de Briqueta: 8107,32 *mm*²
 pixeles/mm² 7,97995

N° DE BRIQUETA	N° DE PÍXELES	AREA (mm ²)	% VACIOS (VALORES MEDIOS)	N° PÍXELES LLENOS	N° PÍXELES VACÍOS
1	64682	8105,565	16,999	53687	10995
2	64688	8106,317	15,998	54339	10349
3	64689	8106,442	16,188	54217	10472
4	64693	8106,944	18,750	52563	12130
5	64683	8105,691	21,984	50463	14220
6	64677	8104,939	21,185	50975	13702
7	64678	8105,064	21,299	50902	13776
8	64692	8106,818	21,779	50603	14089
9	64693	8106,944	14,811	55112	9581
10	64695	8107,194	18,456	52755	11940
11	64672	8104,312	14,903	55034	9638
12	64679	8105,189	17,474	53377	11302
13	64686	8106,067	18,133	52957	11729
14	64675	8104,688	15,196	54847	9828
15	64691	8106,693	15,710	54528	10163
16	64687	8106,192	15,875	54418	10269
17	64693	8106,944	16,850	53792	10901
18	64693	8106,944	16,241	54186	10507
19	64693	8106,944	14,772	55136	9557
20	64687	8106,192	14,851	55080	9607
21	64692	8106,818	15,226	54842	9850
22	64693	8106,944	18,900	52466	12227
23	64671	8104,187	18,733	52556	12115
24	64693	8106,944	22,034	50439	14254
25	64672	8104,312	21,769	50594	14078
Media =			17,765		
Desviación Estándar =			2,589		

Se analizó núcleos para verificar el control que se puede realizar con TC-RX determinando un rango admisible para la variable admisible

**TABLA 1.8.62 Resultado del Análisis VAM de Núcleos
HAM-LA PINTADA**

Recuento	5
Promedio	18,133
Desviación Estándar	4,030
Coefficiente de Variación	0,222
Mínimo	12,301
Máximo	23,328

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN

$$\overline{\%VAM} \pm \text{DESVIACIÓN ESTÁNDAR}$$

RANGO: 14,104 < **% VAM** > 22,163

DATOS DEPURADOS

% VAM (VALORES DEPURADOS)	12,301
	23,328

**TABLA 1.8.63 Resultados del Análisis VAM de Núcleos
SEDECA-CHARAJA**

Recuento	5,000
Promedio	15,668
Desviación Estándar	2,892
Coefficiente de Variación	0,185
Mínimo	10,930
Máximo	18,608

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN

$$\overline{\%VAM} \pm \text{DESVIACIÓN ESTÁNDAR}$$

RANGO: 12,775 < **% VAM** > 18,560

DATOS DEPURADOS

% VAM (VALORES DEPURADOS)	10,930
	18,608

**TABLA 1.8.64 Resultado del Análisis VAM de Núcleos
SEDECA-TOLOMOSA**

Recuento	5,000
Promedio	17,261
Desviación Estándar	3,699
Coefficiente de Variación	0,214
Mínimo	11,792
Máximo	21,582

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN

$\overline{\%VAM} \pm \text{DESVIACIÓN ESTÁNDAR}$

RANGO: 13,562 < **% VAM** > 20,960

DATOS DEPURADOS

% VAM (VALORES DEPURADOS)	11,792
	21,582

**TABLA 1.8.65 Resultado del Análisis VAM de Núcleos
ACV-EL MOLINO**

Recuento	5,000
Promedio	19,946
Desviación Estándar	1,238
Coefficiente de Variación	0,062
Mínimo	18,580
Máximo	21,758

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN

$\overline{\%VAM} \pm \text{DESVIACIÓN ESTÁNDAR}$

RANGO: 18,708 < **% VAM** > 21,184

DATOS DEPURADOS

% VAM (VALORES DEPURADOS)	18,580
	21,758

3.4.3. Contacto Agregado-Agregado

Se cuantificó el número de contactos entre agregados a partir de imágenes bidimensionales, en escala de grises; tomando en cuenta las partículas mayores a 4.75mm (Agregado grueso); esta cuantificación nos permite determinar un indicador de las condiciones en las que se encuentran la estructura formada por los agregados.

Este análisis se realiza a partir de las imágenes transversales TC-RX obtenidas de los moldes cilíndricos de 101.6 mm de diámetro y aproximadamente de 6.5 cm de alto de cada molde.

El análisis de esta variable es por conteo visual de los puntos de contacto agregado-presente en cada imagen bidimensional.

Para el ensayo se procede a dar una pigmentación color rojo a las partículas que componen el agregado grueso. identificado al material cuyas partículas son retenidas en la malla N° 4 (4.75 mm), por lo que es necesario identificar el valor del pixel que delimitará los agregados gruesos de los finos, por ello se realiza la aplicación del pigmento a cada imagen, que no es más que aplicar una capa filtro sobre la imagen con el programa IMAGE-J, al analizar las imágenes se determinó que el rango para esta capa es el 62 (valor límite de separación de agregados), es decir que todas las partículas que posean un color con código menor a este serán pigmentadas definitivamente de color rojo, lo que facilita el conteo de puntos de contacto ya que resaltará los agregados gruesos los cuales se encuentran en escala de grises.

La determinación del valor 62 es recomendado por el autor del método que nos permite validar el dato obtenido., ya que este es el valor medio de los valores analizados en cada imagen obtenida para cada banco analizado, cuyo tamaño máximo de agregado es el de $\frac{3}{4}$ ".

Una vez aplicado el pigmento rojo definitivo se procede a conteo de puntos de contacto en el esqueleto formado por los agregados gruesos.

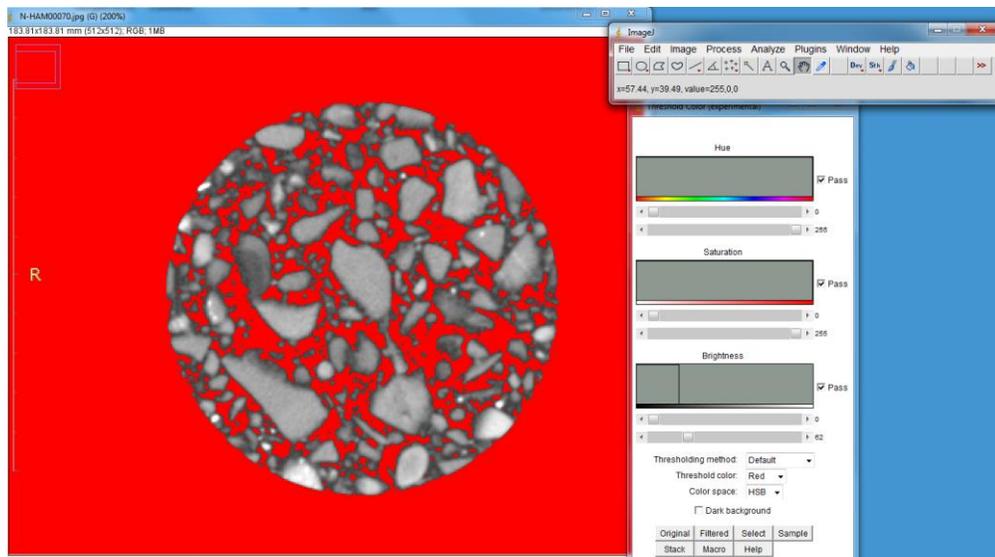
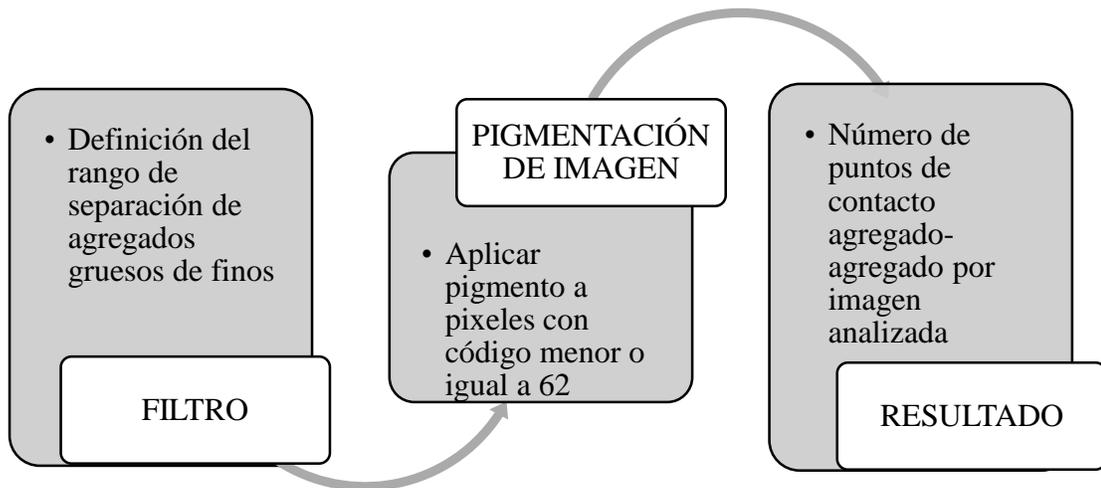


FIGURA 1.8.40 TC-RX con capa de Pigmentación Contacto Agregado- Agregado⁹²

Las siguientes vistas bidimensionales pigmentadas, coadyuvan a mejorar la visualización de agregados gruesos, para facilitar el conteo de puntos de contacto.

⁹² FUENTE: Elaboración Propia.

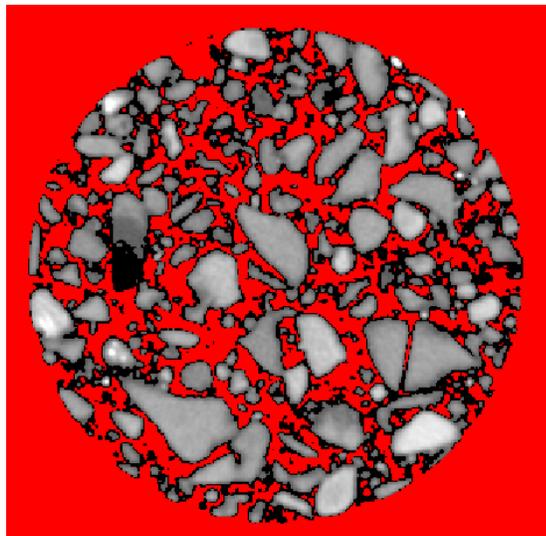


FIGURA 1.8.41 Vista con Marcado de Contornos de los Agregados⁹³

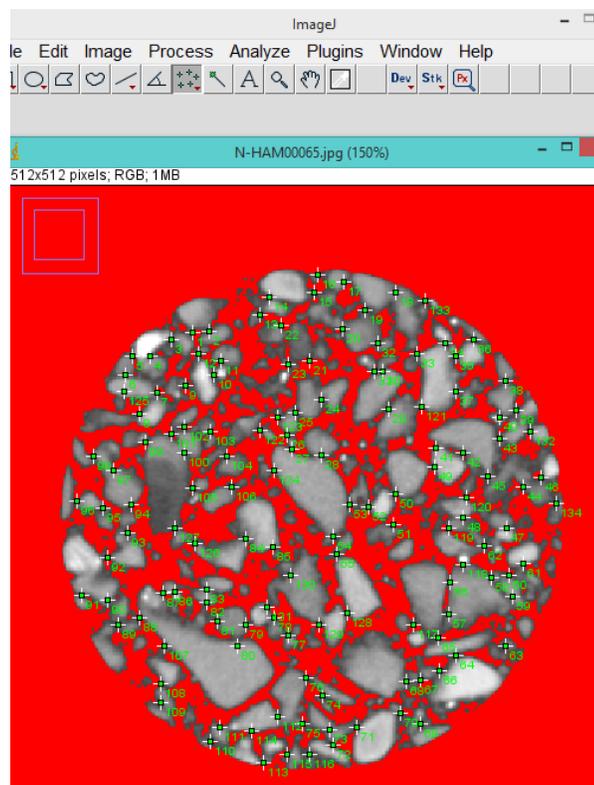


FIGURA 1.8.42 Conteo de Puntos de Contacto en Muestras Asfálticas⁹⁴

⁹³ FUENTE: Elaboración Propia

**TABLA 1.8.66 Resultados Análisis Contacto Agregado-Agregado
HAM-LA PINTADA**

Procedencia de los Agregados: San Mateo
 Tipo de Cemento Asfáltico: BETUNEL
 % CA
 ÓPTIMO 5,74
 Área de Pixel: 0,1253 mm²
 Área de Briqueta: 8107,320 mm²
 pixeles/mm² 7,9799

Nº DE BRIQUETA	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	Nº PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO
1	64692	8106,818	135
2	64697	8107,445	133
3	64693	8106,944	126
4	64663	8103,184	130
5	64664	8103,310	129
6	64696	8107,320	125
7	64670	8104,061	124
8	64688	8106,317	120
9	64670	8104,061	119
10	64685	8105,941	137
11	64680	8105,315	149
12	64692	8106,818	143
13	64702	8108,072	138
14	64641	8100,427	140
15	64685	8105,941	145
16	64670	8104,061	128
17	64685	8105,941	124
18	64659	8102,683	141
19	64664	8103,310	136
20	64685	8105,941	133
21	64688	8106,317	139
22	64665	8103,435	141
23	64680	8105,315	127
24	64687	8106,192	125
Media =			133
Desviación Estándar =			8,225

⁹⁴ FUENTE: Elaboración Propia

TABLA 1.8.67 Resultados Análisis Contacto Agregado - Agregado SEDECA-CHARAJA

Procedencia de los Agregados: CAMACHO
 Tipo de Cemento Asfáltico: BETUPEN
 % CA ÓPTIMO 5,69
 Área de
 Pixel: 0,1253 mm²
 Área de Briqueta: 8107,320 mm²
 pixeles/mm² 7,9799

Nº DE BRIQUETA	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	Nº PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO
1	64685	8105,941	146
2	64659	8102,683	143
3	63898	8007,319	145
4	64682	8105,565	135
5	64681	8105,440	135
6	64647	8101,179	127
7	64670	8104,061	128
8	64689	8106,442	142
9	63875	8004,437	140
10	64694	8107,069	141
11	64652	8101,806	140
12	64651	8101,681	127
13	64658	8102,558	127
14	64639	8100,177	133
15	64682	8105,565	136
16	64493	8081,881	134
17	64689	8106,442	139
18	64673	8104,437	143
19	64671	8104,187	132
20	64659	8102,683	141
21	64704	8108,322	140
22	64689	8106,442	127
23	64696	8107,320	128
24	64683	8105,691	127
25	64712	8109,325	128
26	64640	8100,302	133
MEDIA			135
Desviación Estándar =			6,466

TABLA 1.8.68 Resultados Análisis Contacto Agregado - Agregado SEDECA-TOLOMOSA

Procedencia de los Agregados: TOLOMOSA
Tipo de Cemento
Asfáltico: BETUPEN
% CA
ÓPTIMO 5,51
Área de Pixel: 0,1253 mm²
Área de Briqueta: 8107,320 mm²
pixeles/mm² 7,9799

Nº DE BRIQUETA	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	Nº PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO
1	64678	8105,064	143
2	64689	8106,442	127
3	64694	8107,069	138
4	64655	8102,182	130
5	64686	8106,067	131
6	64667	8103,686	129
7	64687	8106,192	119
8	64691	8106,693	134
9	64681	8105,440	143
10	64689	8106,442	124
11	64694	8107,069	136
12	64694	8107,069	121
13	64689	8106,442	128
14	64695	8107,194	126
15	64689	8106,442	114
16	64686	8106,067	117
17	64699	8107,696	135
18	64691	8106,693	119
19	64694	8107,069	122
20	64691	8106,693	126
21	64678	8105,064	134
22	64685	8105,941	130
23	64662	8103,059	134
24	64667	8103,686	134
25	64679	8105,189	142
26	64689	8106,442	128
27	64687	8106,192	137
28	64695	8107,194	132
29	64667	8103,686	124
Media =			130
Desviación Estándar =			7,684

**TABLA 1.8.69 Resultados Análisis Contacto Agregado - Agregado
ACV-EL MOLINO**

Procedencia de los Agregados: ZONA ALTA
 Tipo de Cemento Asfáltico: BETUPEN
 % CA
 ÓPTIMO 5,99
 Área de Pixel: 0,1253 mm²
 Área de Briqueta: 8107,320 mm²
 pixeles/mm² 7,9799

Nº DE BRIQUETA	Nº DE PÍXELES	AREA (mm ²)	Nº PUNTOS DE CONTACTO AGREGADO VALOR MEDIO
1	64682	8105,565	136
2	64688	8106,317	137
3	64689	8106,442	136
4	64693	8106,944	130
5	64683	8105,691	121
6	64677	8104,939	124
7	64678	8105,064	121
8	64692	8106,818	122
9	64693	8106,944	141
10	64695	8107,194	132
11	64672	8104,312	139
12	64679	8105,189	132
13	64686	8106,067	129
14	64675	8104,688	140
15	64691	8106,693	137
16	64687	8106,192	136
17	64693	8106,944	133
18	64693	8106,944	136
19	64693	8106,944	141
20	64687	8106,192	145
21	64692	8106,818	140
22	64693	8106,944	127
23	64671	8104,187	127
24	64693	8106,944	117
25	64672	8104,312	121
Media =			132
Desviación Estándar =			7,741

Se analizó núcleos para verificar el control que se puede realizar con TC-RX determinando un rango admisible para la variable admisible

TABLA 1.8.70 Resultados Análisis Contacto Agregado - Agregado en Núcleos HAM-LA PINTADA

Recuento	5,000
Promedio	126,000
Desviación Estándar	6,693
Coefficiente de Variación	0,053
Mínimo	115,000
Máximo	131,000

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN

$$\overline{N^{\circ}DE CONTACTOS} \pm DESVIACIÓN ESTÁNDAR$$

RANGO: 119 < **N° DE CONTACTOS** > 133

DATOS DEPURADOS

PUNTOS (VALORES DEPURADOS)	115
-----------------------------------	-----

TABLA 1.8.71 Resultados Análisis Contacto Agregado - Agregado en Núcleos SEDECA-CHARAJA

Recuento	5,000
Promedio	133,000
Desviación Estándar	7,259
Coefficiente de Variación	0,055
Mínimo	126,000
Máximo	143,000

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN

$$\overline{N^{\circ}DE CONTACTOS} \pm DESVIACIÓN ESTÁNDAR$$

RANGO: 126 < **N° DE CONTACTOS** >140

DATOS DEPURADOS

PUNTOS (VALORES DEPURADOS)	127
	143

TABLA 1.8.72 Resultados Análisis Contacto Agregado-Agregado en Núcleos SEDECA-TOLOMOSA

Recuento	5,000
Promedio	135,000
Desviación Estándar	8,050
Coefficiente de Variación	0,060
Mínimo	126,000
Máximo	143,000

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN

$$\overline{N^{\circ}DE CONTACTOS} \pm DESVIACIÓN ESTÁNDAR$$

RANGO: 127 < **N° DE CONTACTOS** >143

DATOS DEPURADOS

PUNTOS (VALORES DEPURADOS)	126
-----------------------------------	-----

TABLA 1.8.73 Resultados Análisis Contacto Agregado-Agregado en Núcleos ACV-EL MOLINO

Recuento	5,000
Promedio	119,000
Desviación Estándar	7,956
Coefficiente de Variación	0,067
Mínimo	108,000
Máximo	127,000

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN

$$\overline{N^{\circ}DE CONTACTOS} \pm DESVIACIÓN ESTÁNDAR$$

RANGO: 111 < **N° DE CONTACTOS** >127

DATOS DEPURADOS

PUNTOS (VALORES DEPURADOS)	---
-----------------------------------	-----

3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para realizar el análisis de la estructura interna de las mezclas asfálticas a partir de Tomografías computarizadas de rayos – X (TC–RX), es necesario evaluar los resultados obtenidos por las TC–RX, realizadas a partir de briquetas preparadas con los porcentajes óptimos, obtenidos para cada mezcla por la metodología Marshall y sobre núcleos extraídos de tramos ejecutados por cada una de las plantas asfálticas utilizadas para este trabajo investigativo

Para lo cual se procede a presentar tablas, cuadros y figuras de análisis comparativo de mezclas asfálticas utilizadas en la investigación, las cuales pertenecen a las principales plantas asfálticas presentes en nuestro medio.

Con la finalidad de contar con datos confiables se realizó la fabricación de 30 briquetas Marshall por diseño asfáltico analizado; como se trata de cuatro mezclas asfálticas, se realizaron un total de 120 briquetas, 90 de ellas realizadas con cemento asfáltico convencional (85/100) y 30 con cemento asfáltico modificado (60/70) como se describe en el anterior capítulo.

A continuación presentaremos una tabla de datos donde se observa el contenido óptimo de cemento asfáltico, porcentaje de vacíos y porcentaje de vacíos del agregado mineral; obtenidos del diseño Marshall realizado para cada banco.

TABLA 3.5.1 Valores Marshall Obtenidos de Diseño⁹⁵

BANCO DE DATOS	% C.A.	%VACÍOS	%VAM
HAM-LA PINTADA	5,740	3,710	16,700
SEDECA-CHARAJA	5,680	3,700	16,600
SEDECA-TOLOMOSA	5,510	3,590	16,300
ACV-EL MOLINO	5,990	3,510	17,000

Se observa que los datos se encuentran dentro de las normas establecidas; % vacíos entre 3 y 5, %VAM mayor a 14 y % óptimo de cemento asfáltico entre 5 y 7.

Se procede a realizar tres análisis sobre cada imagen de TC-RX.

⁹⁵ FUENTE: Elaboración Propia

3.5.1. Análisis de Briquetas Asfálticas Diseñadas

3.5.1.1. Porcentaje de Vacíos

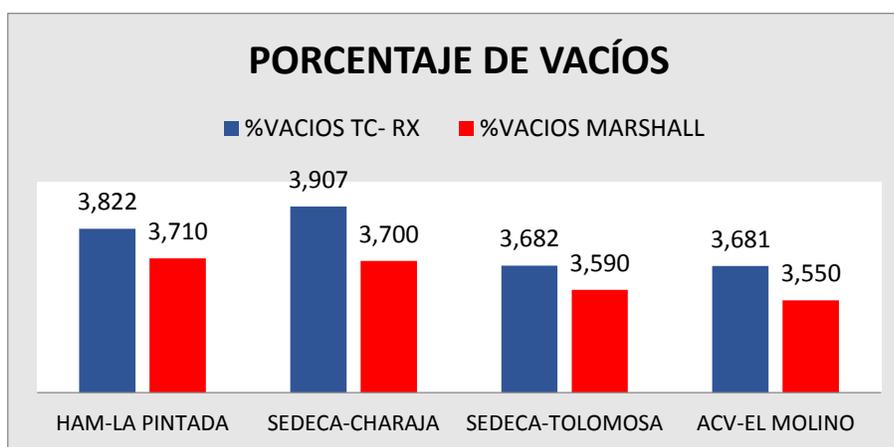
El porcentaje de vacíos debe encontrarse dentro de un rango no menor al 3% y no mayor al 5% según norma.

En el que se realiza un análisis binario de las imágenes TC-RX, se establece una valoración del % de vacíos y contacto agregado-agregado a través de la medición por píxeles.

En cuanto al porcentaje de vacíos, los valores que se encuentren fuera del rango establecido serán depurados para obtener resultados más exactos para cada mezcla asfáltica.

En el cuadro mostrado a continuación observaremos el porcentaje de vacíos determinado para cada banco de datos analizado tanto por el método de TC-RX, como por la metodología Marshall.

Grafica 3.5.2 Porcentaje de Vacíos En cada Muestra Analizada⁹⁶



El valor obtenido para el banco de datos denominado HAM – LA PINTADA, es de 3,822 %, valor que es un 3,019 % mayor que el valor obtenido por la metodología Marshall que es de 3,710 %; cuyos agregados provienen de la zona de San Mateo y

⁹⁶ FUENTE: Elaboración Propia

cemento asfáltico convencional "BETUNEL", acopiados en la planta asfáltica de "La Pintada".

El valor obtenido para el banco de datos denominado SEDECA – CHARAJA, es de 3,907% ,valor que es 5,594 % mayor que el valor obtenido por la metodología Marshall que es 3,700%; cuyos agregados provienen de la zona de charaja y cemento asfáltico convencional " BETUPEN".

El valor obtenido para el banco de datos denominado SEDECA – TOLOMOSA, es de 3,682 % valor que es 2,563 % mayor que el valor obtenido por la metodología Marshall que es 3,590 %; cuyos agregados provienen de la zona de Tolomosa y cemento asfáltico convencional " BETUPEN".

Los materiales del banco de datos SEDECA – CHARAJA y SEDECA-TOLOMOSA, son acopiados en la planta asfáltica de " Charaja".

El valor obtenido para el banco de datos denominado ACV- EL MOLINO, es de 3,681 % valor que es 3,369 % mayor que el valor obtenido por la metodología Marshall que es de 3,550 %; cuyos agregados provienen de la zona alta y cemento asfáltico modificado "BETUFLEX", materiales acopiados en la planta asfáltica " El Molino".

Los porcentajes de vacíos obtenidos mediante TC-RX, determinan valores dentro del rango (3% - 5 %) especificado por la norma utilizada para diseño de pavimentos flexibles en nuestro país.

Los valores obtenidos por medio de TC-RX no sobrepasan el 10% de diferencia con respecto al valor Marshall diseño, por lo que se pueden adoptar como valores admisibles, obteniendo un margen de confianza del 90%.

3.5.1.2. Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM)

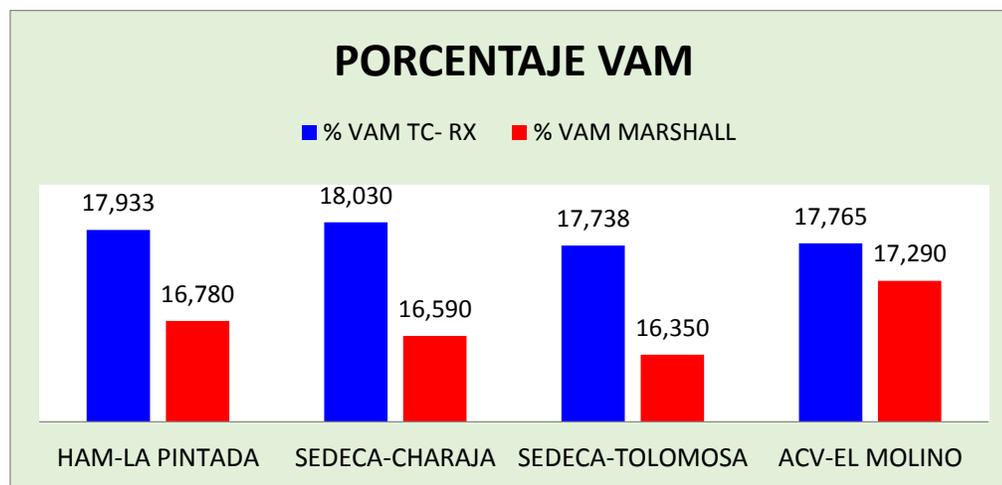
Este porcentaje está en función del tamaño máximo nominal de agregado utilizado dentro de la mezcla asfáltica.

Para nuestro análisis el valor mínimo de VAM establecido por norma es de 14%.

Por lo que los valores que se encuentren por debajo de este valor serán depurados.

Presentaremos a continuación un cuadro donde se observa la variación del porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM), para cada banco de datos analizado por TC-RX y por la metodología Marshall.

Gráfica 1.8.10 Porcentajes VAM para cada Muestra Analizada⁹⁷



Para el banco de datos HAM- LA PINTADA se obtiene mediante TC- RX un valor de 17,933 % como porcentaje VAM, valor que es mayor en un 6,871% con respecto al valor obtenido del diseño Marshall que es de 16,780 %.

Para el banco de datos SEDECA-CHARAJA se obtiene mediante TC- RX un valor de 18,030 % como porcentaje VAM, valor que es mayor en un 8,678 % con respecto al valor obtenido del diseño Marshall que es de 16,590 %.

Para el banco de datos SEDECA - TOLOMOSA se obtiene mediante TC- RX un valor de 17,738 % como porcentaje VAM, valor que es mayor en un 8,489 % con respecto al valor obtenido del diseño Marshall que es de 16,350 %.

Para el banco de datos ACV-EL MOLINO se obtiene mediante TC- RX un valor de 17,765 % como porcentaje VAM, valor que es mayor en un 2,747% con respecto al valor obtenido del diseño Marshall que es de 17,290 %.

⁹⁷ FUENTE: Elaboración Propia

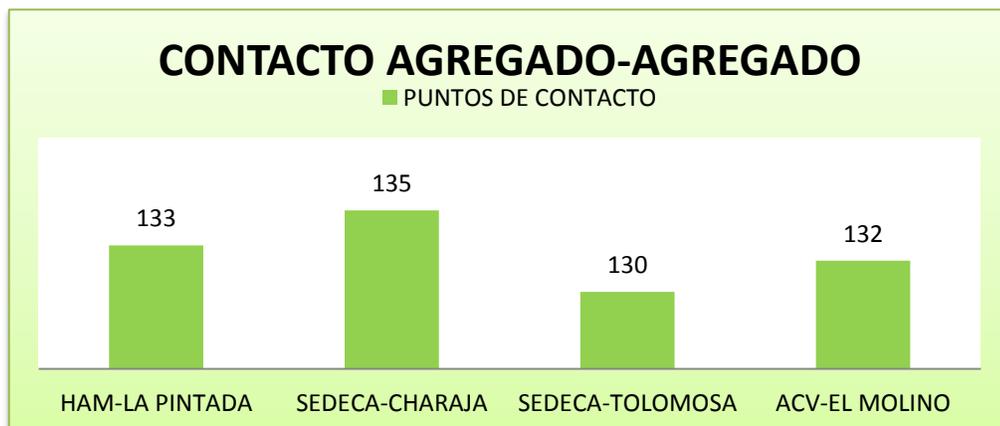
Se puede observar que todos los valores TC-RX se encuentran por arriba del valor mínimo especificado por norma que es de 14,000 % para VAM, debido a que en todos los casos se usa agregado con tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ".

Los valores VAM obtenidos por TC-RX no sobrepasan el 10 % de diferencia de los valores obtenidos mediante diseño Marshall; por lo que se tiene un margen de confianza del 90%.

3.5.1.3. Contacto Agregado – Agregado

El contacto entre agregados representa una mezcla cerrada o abierta debido a que esto influirá en la porosidad de la mezcla por lo que la absorción de humedad puede aumentar o disminuir con respecto a esta variable.

Gráfica 1.8.11 Puntos de Contacto en las Muestras Analizadas⁹⁸



Una vez analizados los valores de puntos de contacto determinados mediante las TC-RX, obtuvimos los valores medios de:

- Para el banco de datos HAM-LA PINTADA, 133 puntos de contacto.
- Para el banco de datos SEDECA-CHARAJA, 135 puntos de contacto.
- Para el banco de datos SEDECA-TOLOMOSA, 130 puntos de contacto.

⁹⁸ FUENTE: Elaboración Propia

- Para el banco de datos ACV-EL MOLINO, 132 puntos de contacto.

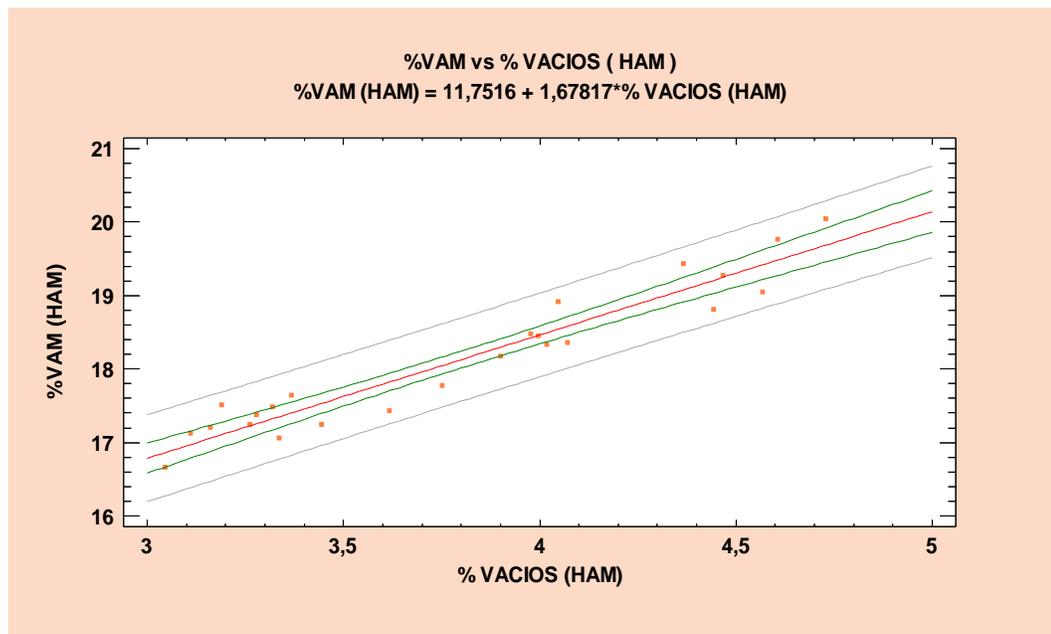
Se puede observar que los puntos de contacto para una mezcla asfáltica elaborada con los porcentajes óptimos de cemento asfáltico los puntos de contacto se encuentran por encima de los 100 puntos de contacto.

3.5.2. Relación Entre Variables

3.5.2.1. VAM – Vacíos

Se realizara el análisis de las variables porcentaje de vacíos del agregado mineral frente al porcentaje de vacíos, para determinar una posible relación entre ambas, la cual la presentamos en el siguiente cuadro.

Gráfica 1.8.12 Análisis Estadístico VAM vs VACÍOS HAM-LA PINTADA⁹⁹

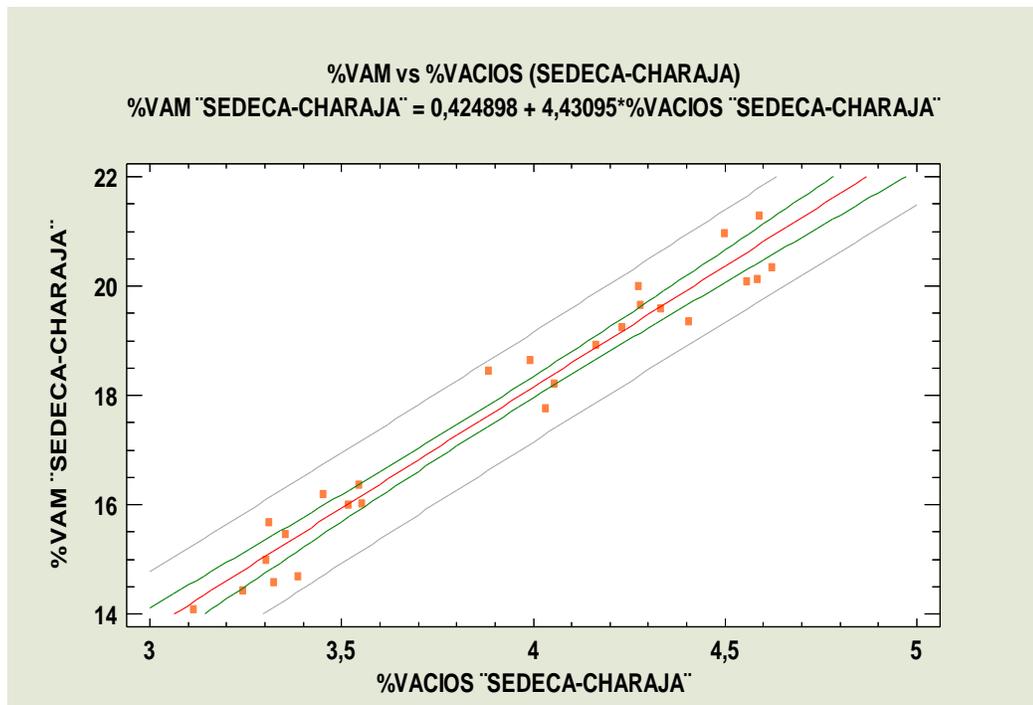


Los datos obtenidos mediante TC-RX en el banco de datos HAM-LA PINTADA tanto de porcentaje de vacíos como de porcentaje de vacíos del agregado mineral

⁹⁹ FUENTE: Elaboración Propia

observado en la **Gráfica 3.5.5.1**, tienen cierta relación representada en el cuadro arriba mostrado el cual se ajusta a una recta de regresión lineal con el 92,279% de confianza lo que quiere decir que existe un margen de error del 7,721 %; habiéndose trabajado con 30 muestras de las cuales fueron depuradas 6 debido que no cumplían con las especificaciones en el porcentaje de vacíos y/o porcentaje de vacíos del agregado mineral establecidos por norma; para obtener resultados más confiables.

Gráfica 1.8.13 Análisis Estadístico VAM vs VACÍOS SEDECA-CHARAJA¹⁰⁰

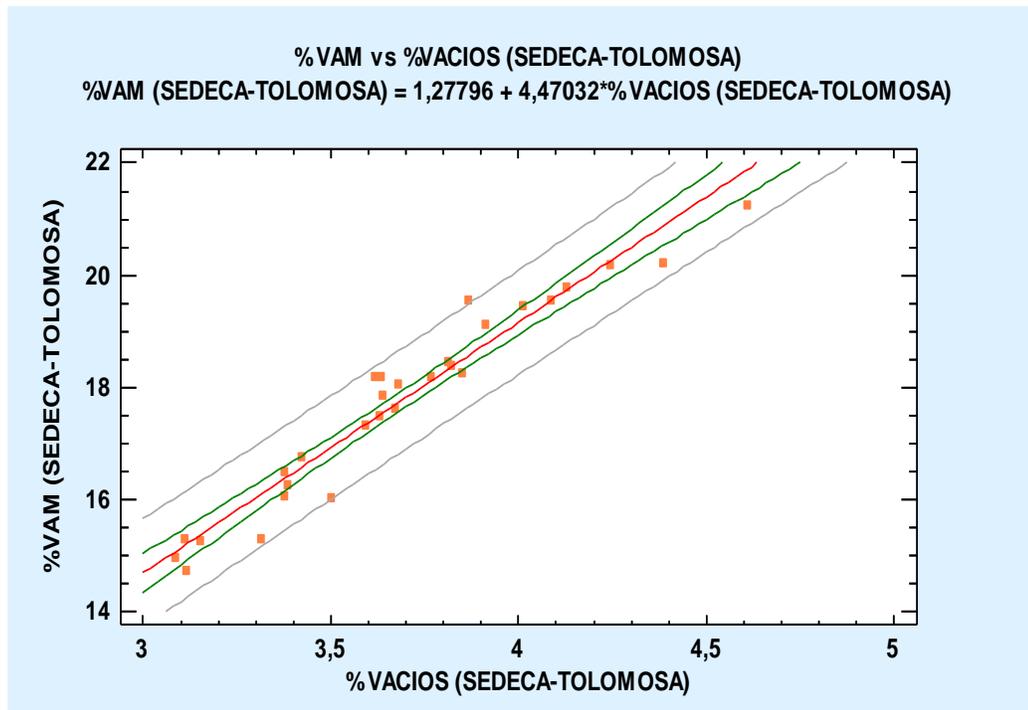


En el anterior cuadro observamos los datos obtenidos del banco de datos SEDECA-CHARAJA mediante TC-RC que se observa en la **Gráfica3.5.5.2** , porcentaje de vacíos y porcentaje de vacíos del agregado mineral, los cuales son ajustados mediante regresión lineal con un nivel de confianza del 95,880%, lo cual quiere decir que se presenta un margen de error del 4,120%; habiéndose trabajado con 30 muestras de las cuales fueron depuradas 4 , debido a que no cumplían con las especificaciones en

¹⁰⁰ FUENTE: Elaboración Propia

el porcentaje de vacíos y/o porcentaje de vacíos del agregado mineral establecidos por norma; para obtener resultados más confiables.

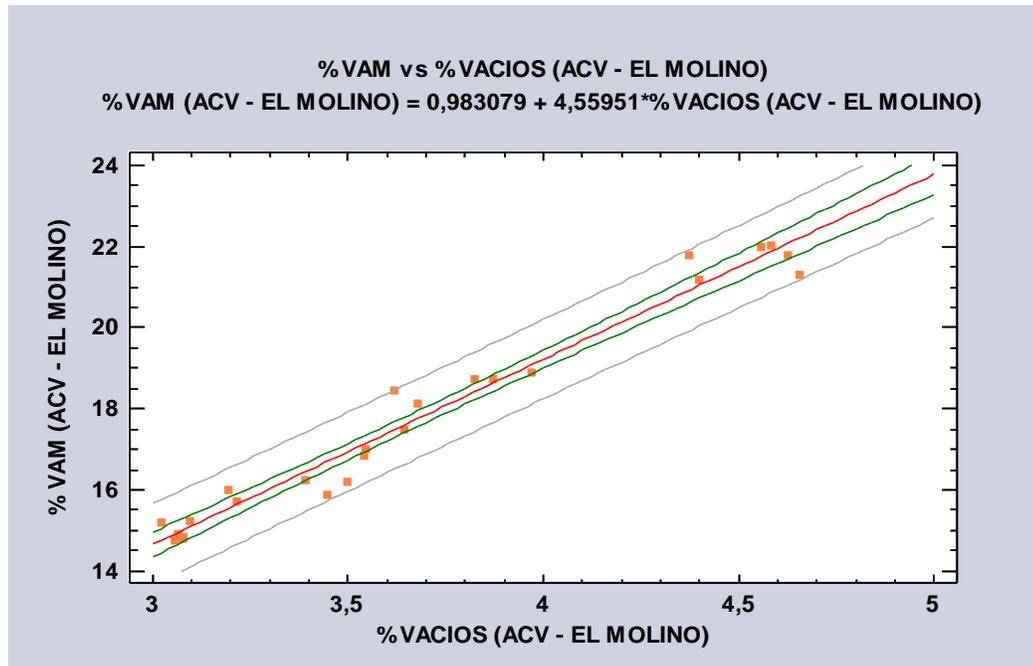
Gráfica 1.8.14 Análisis Estadístico VAM vs VACÍOS SEDECA-TOLOMOSA¹⁰¹



Para el banco de datos SEDECA-TOLOMOSA se observa en la **Gráfica 3.5.5.3** la relación existente entre el porcentaje de vacíos del agregado mineral frente al porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica obtenidos mediante TC-RX, por lo cual los datos son ajustados a una regresión lineal con un nivel de confianza del 94,028 % lo cual quiere decir que se tiene un margen de error del 5,972 % ; para dicho análisis se elaboraron 30 muestras de las cuales se depuro 1, debido a que esta no cumplía con los valores de porcentaje de vacíos y/o porcentaje de vacíos del agregado mineral especificados por la norma.

¹⁰¹ FUENTE: Elaboración Propia

Gráfica 1.8.15 Análisis Estadístico VAM vs VACÍOS ACV-EL MOLINO¹⁰²



En el cuadro presentado en la parte superior se observa en la **Gráfica 3.5.5.4** de los datos obtenidos mediante TC-RX del banco de datos ACV-EL MOLINO para las variables de porcentajes de vacíos y porcentaje de vacíos del agregado mineral, los cuales fueron ajustados a una regresión lineal con un nivel de confianza del 96,957% lo que representa un error del 3,043%; para dicho análisis se elaboraron 30 muestras de las cuales se depuraron 5, muestras debido a que estas no cumplían con los valores de porcentajes de vacíos y/o porcentaje de vacíos del agregado mineral especificados por norma.

Habiéndose observado la representación de los cuatro bancos de datos analizados se puede observar que dentro de la estructura interna de la mezcla asfáltica a menor porcentaje de vacíos menor porcentaje de vacíos del agregado mineral presenta y viceversa, por lo que se ajusta a un modelo lineal de pendiente positiva (recta ascendente).

¹⁰² FUENTE: Elaboración Propia

Por lo que a medida que aumente el porcentaje de vacíos también aumentara el contenido del porcentaje vacíos del agregado mineral.

Se verifica que para ningún caso el VAM es menor a 14% y el porcentaje de vacíos es menor a 3, como lo indica la norma para mezclas asfálticas cuyo tamaño máximo de agregado es $\frac{3}{4}$.

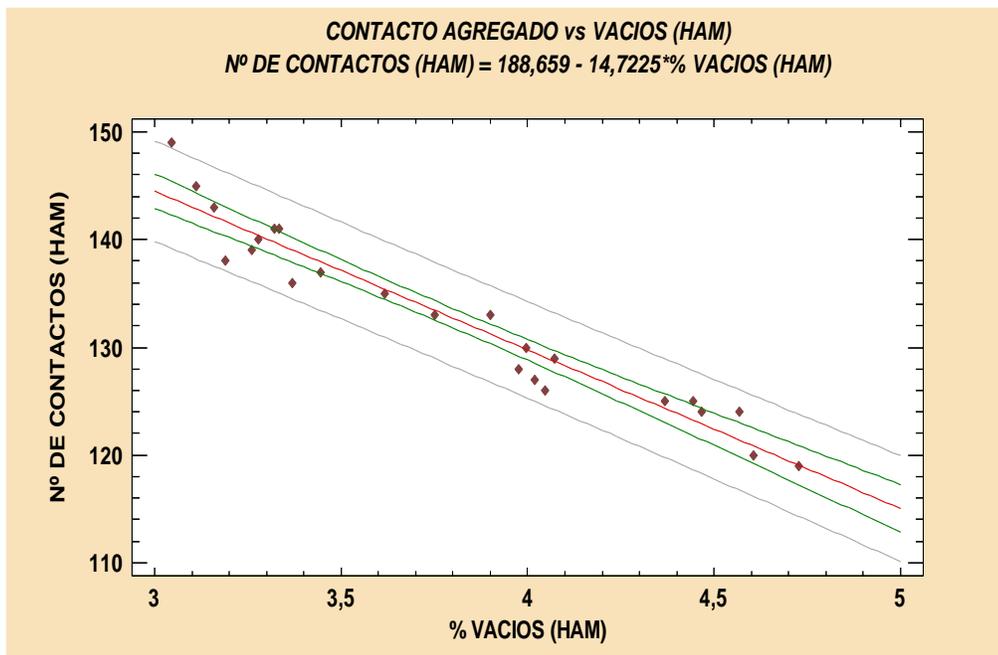
También podemos observar que el VAM limite no sobrepasa el 25 % para un valor máximo de contenido de vacíos del 5 % indicado por la norma.

3.5.2.2. Contacto Agregado – Porcentaje de Vacíos

Estas variables son importantes por lo que determinaremos la relación existente entre ambas dentro de las mezclas asfálticas.

Gráfica 1.8.16 Análisis Estadístico Contacto Agregado vs Vacíos

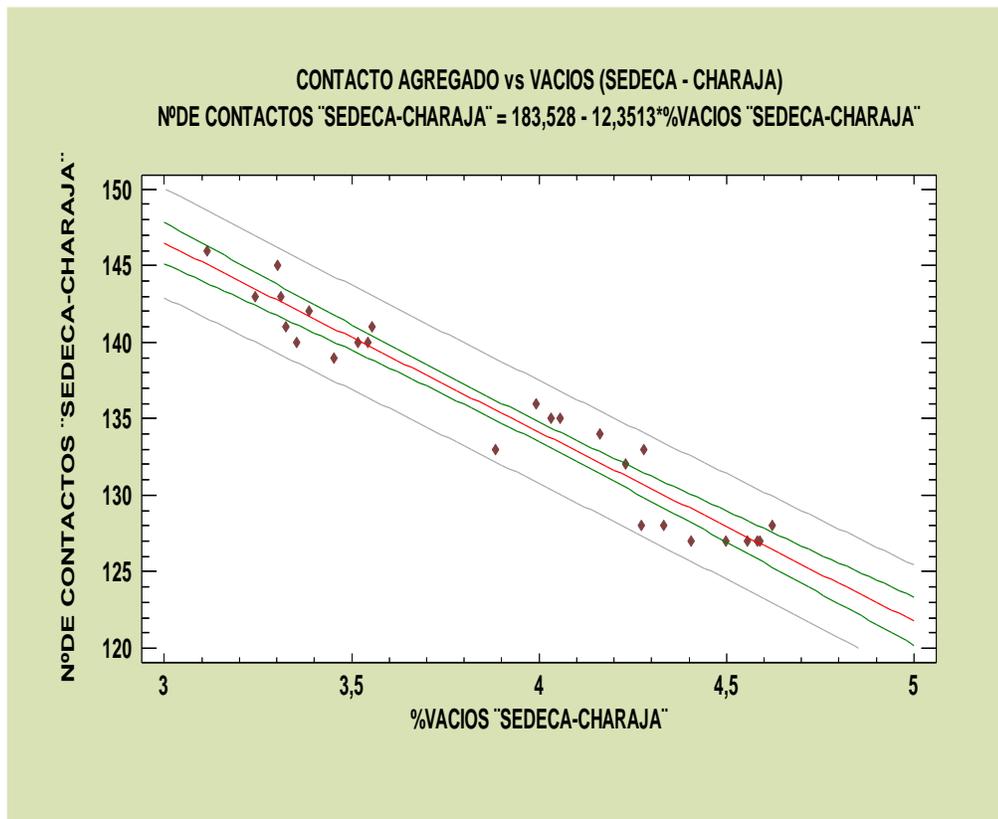
HAM-LA PINTADA¹⁰³



¹⁰³ FUENTE: Elaboración Propia

De acuerdo a los datos del banco HAM-LA PINTADA relacionando las variables contacto agregado–agregado y porcentaje de vacíos observado en la **Gráfica 3.5.5.5**, se obtiene una dispersión con el 93,687% de confianza lo cual quiere decir que presenta un margen de error del 6,313%.

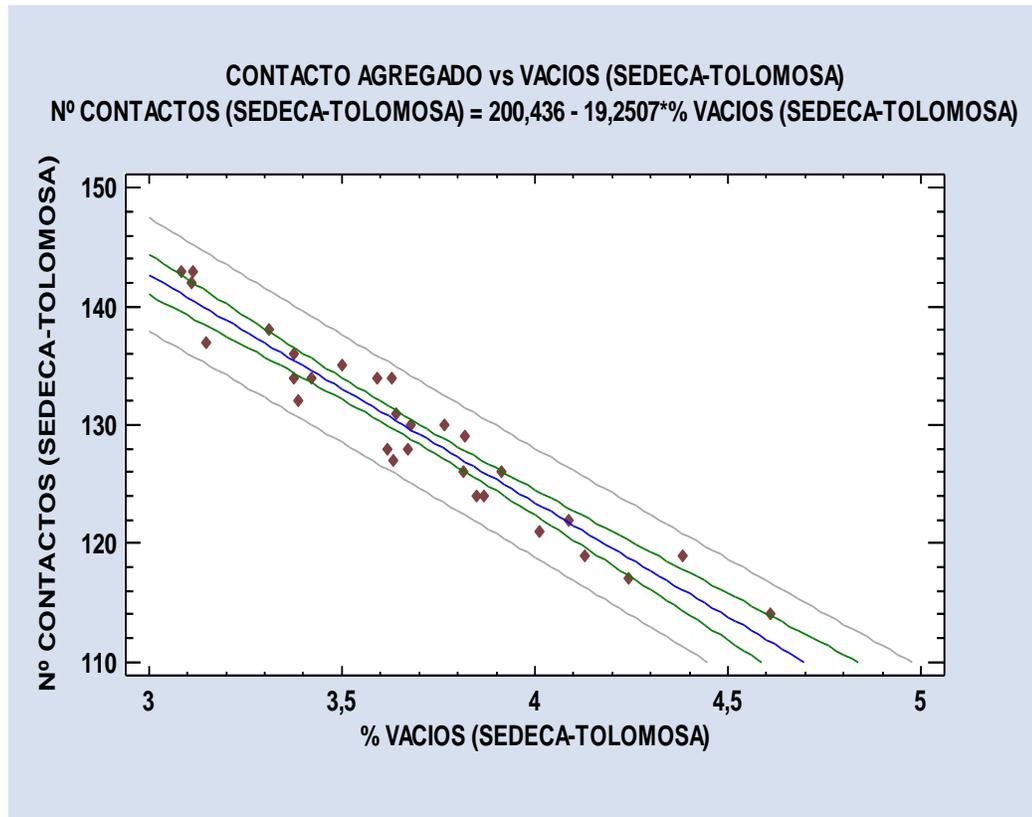
**Gráfica 1.8.17 Análisis Estadístico Contacto Agregado vs Vacíos
SEDECA-CHARAJA¹⁰⁴**



Como se puede observar en la **Gráfica 3.5.5.6** se aprecia los datos del banco de datos SEDECA-CHARAJA relacionando las variables contacto agregado – agregado y porcentaje de vacíos, obteniendo así una dispersión con el 94,113 % de confianza lo cual representa un margen de error del 5,887%.

¹⁰⁴ FUENTE: Elaboración Propia

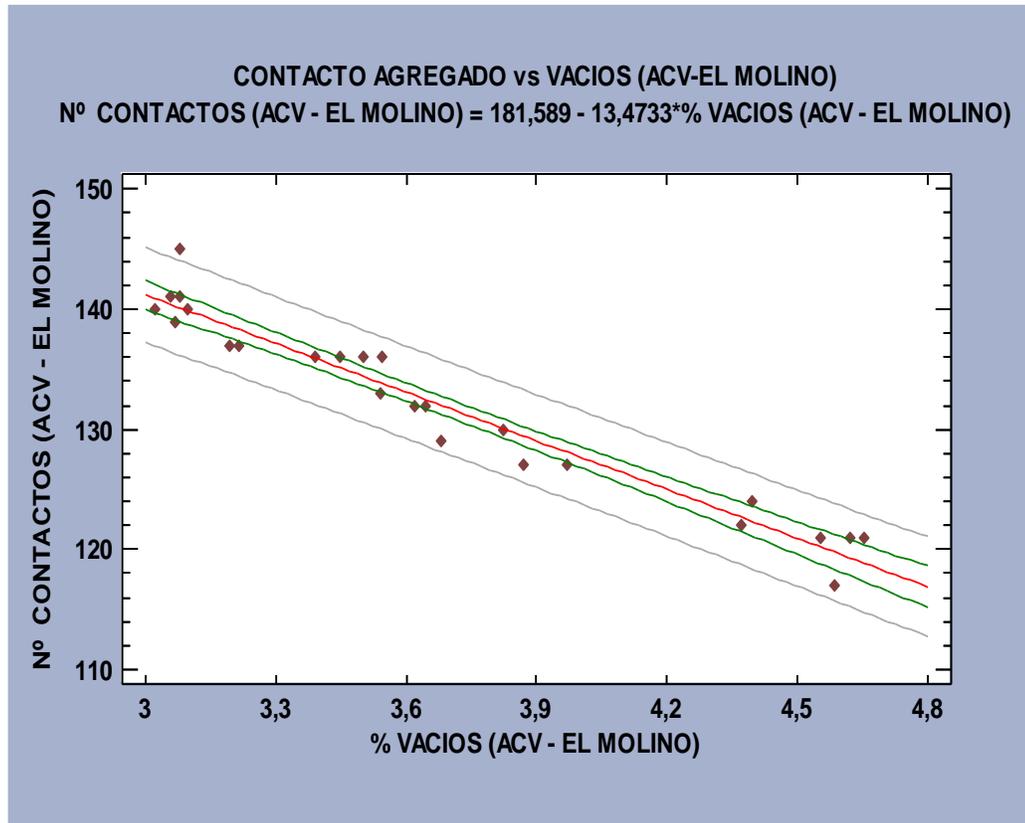
**Grafica 1.8.18 Análisis Estadístico Contacto Agregado vs Vacíos
SEDECA-TOLOMOSA¹⁰⁵**



En la **Gráfica 3.5.5.7** se presentan los datos del banco denominado SEDECA-TOLOMOSA, relacionando las variables contacto agregado-agregado y porcentaje de vacíos, los cuales presentan una dispersión con un nivel de confianza del 92,289% y un margen de error del 7,711 %.

¹⁰⁵ FUENTE Elaboración Propia

**Grafica 1.8.19 Análisis Estadístico Contacto Agregado vs Vacíos
ACV-EL MOLINO¹⁰⁶**



Para el banco de datos ACV-EL MOLINO presentado en la **Gráfica3.5.5.8** se muestra la relación entre las variables contacto agregado-agregado y porcentajes de vacíos, los cuales presentan una dispersión con un nivel de confianza del 94,678 % y un margen de error del 5,322%.

Observando el cuadro presentado para cada banco de datos analizado, relacionando las variables contacto agregado- agregado y porcentaje de vacíos, se determina que a menor porcentaje de vacíos, mayor puntos de contacto entre agregados presenta la

¹⁰⁶ FUENTE: Elaboración Propia

mezcla asfáltica o viceversa, tanto para mezclas preparadas con cemento asfáltico convencional o cemento asfáltico modificado.

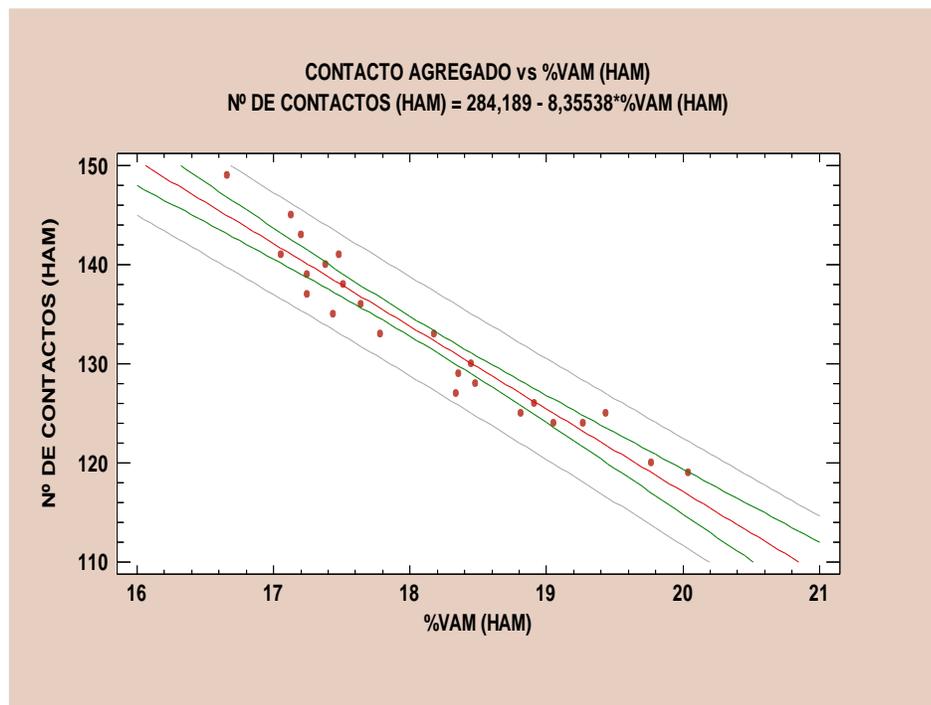
Se presenta un modelo de ajuste lineal con pendiente negativa lo cual indica una recta descendente.

Se observa que para mezclas asfálticas cuyo agregado máximo es de $\frac{3}{4}$ " los puntos de contacto no exceden de 140 y en ningún caso menor a 100 puntos de contacto.

3.5.2.3. Contacto agregado – VAM

Se realizó el análisis de estas dos variables para determinar la relación que existe entre ellas.

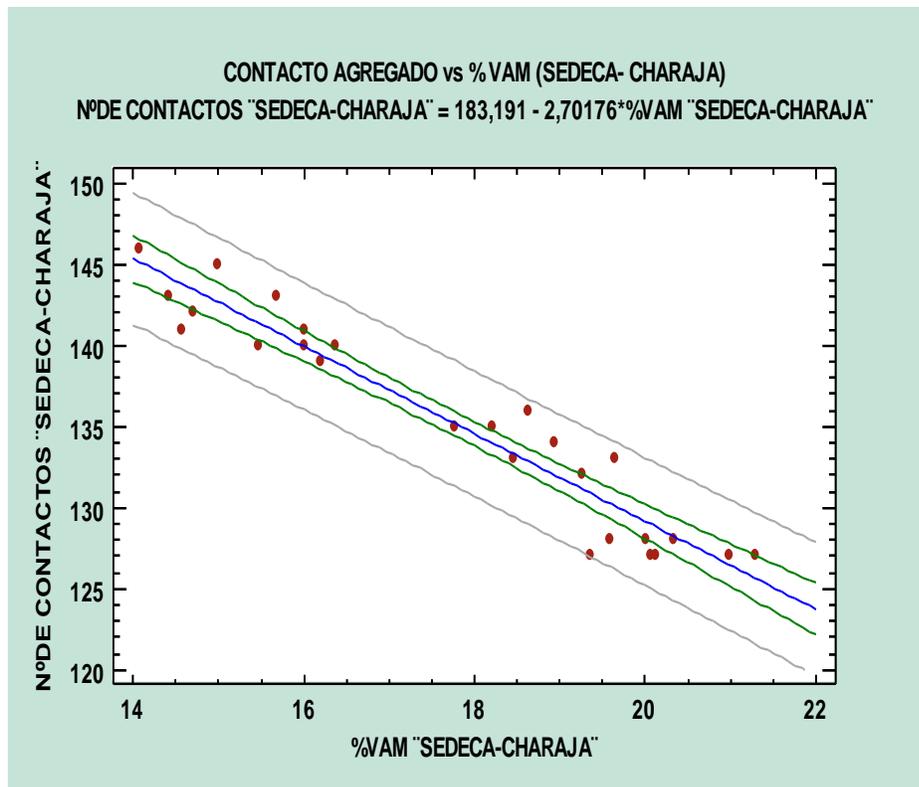
**Gráfica 1.8.20 Análisis Estadístico Contacto Agregado vs VAM
HAM-LA PINTADA¹⁰⁷**



¹⁰⁷ FUENTE: Elaboración Propia

Analizando los valores del banco de datos HAM – LA PINTADA en la **Gráfica 3.5.5.9**, para las variables contacto agregado-agregado y porcentaje de vacíos del agregado mineral, podemos observar una dispersión de datos que se ajusta a una regresión lineal con un nivel de confianza del 92,091 % y un margen de error del 7,909%.

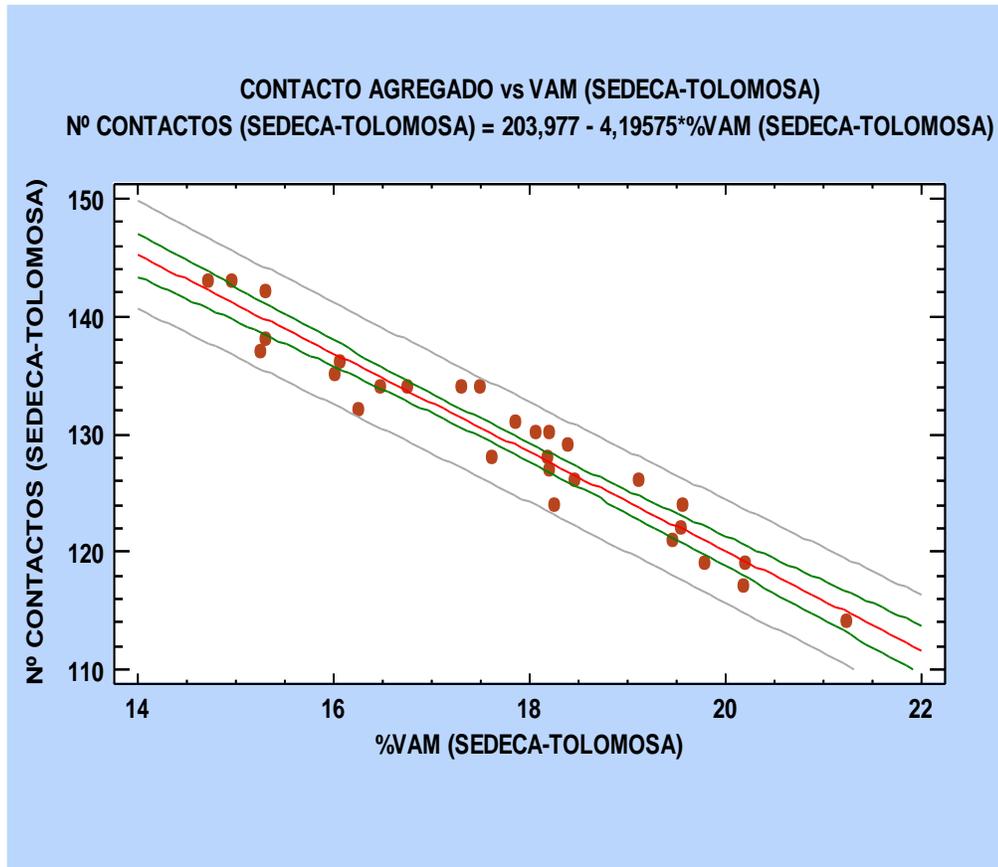
**Gráfica 1.8.21 Análisis Estadístico Contacto Agregado vs VAM
SEDECA-CHARAJA¹⁰⁸**



Para el banco de datos SEDECA-CHARAJA en la **Gráfica 3.5.5.10**, observamos las variables puntos de contactos y porcentajes de vacíos del agregado mineral, que nos proporciona una dispersión con un nivel de confianza del 9,211% y un margen de error de 7,789%.

¹⁰⁸ FUENTE : Elaboración Propia

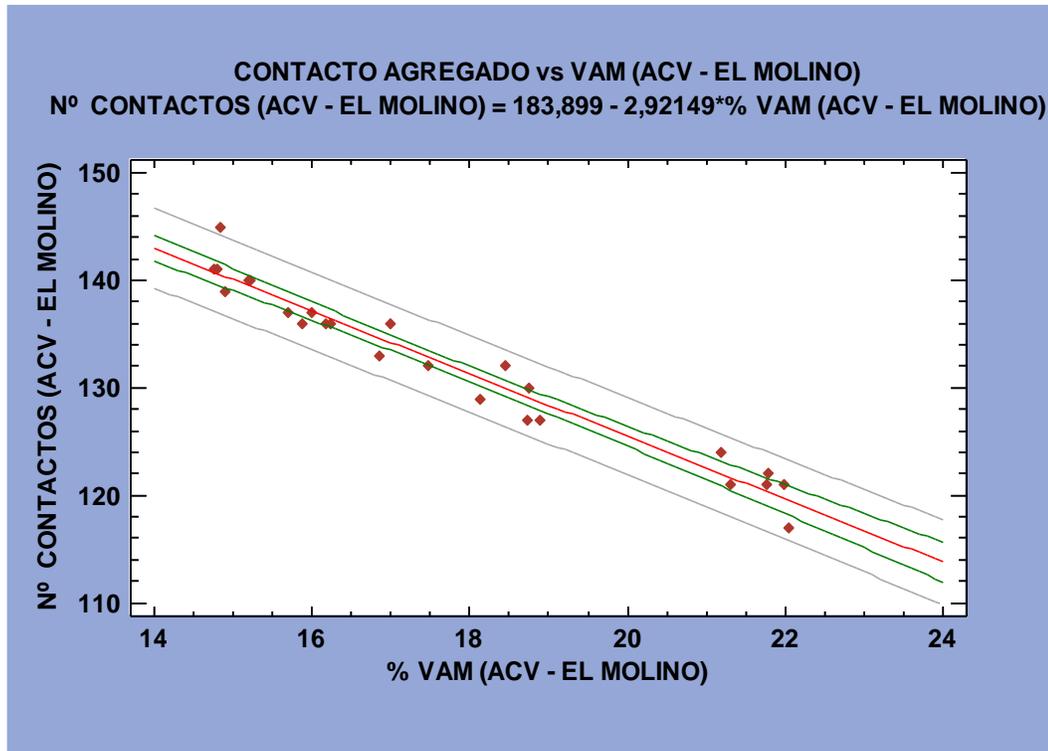
**Gráfica 1.8.22 Análisis Estadístico Contacto Agregado vs VAM
SEDECA-TOLOMOSA¹⁰⁹**



En la **Gráfica 3.5.5.11** se presentan los datos del banco de datos SEDECA-TOLOMOSA, observando las variables contacto agregado-agregado y porcentaje de vacíos del agregado mineral, las cuales presentan una dispersión con un nivel de confianza del 93,175 % y un margen de error del 6,825%.

¹⁰⁹ FUENTE : Elaboración Propia

**Gráfica 1.8.23 Análisis Estadístico Contacto Agregado vs VAM
ACV-EL MOLINO¹¹⁰**



En la **Gráfica 3.5.5.12** se observan los datos del banco ACV- EL MOLINO, con respecto a las variables contacto agregado – agregado y porcentaje de vacíos del agregado mineral los cuales presentan una dispersión con nivel de confianza del 95,448 % y un margen de error del 4,552 %.

Habiéndose presentado los cuadros de todos los bancos de datos analizados, se observa que la tendencia lineal en todos los casos es descendente, por lo que se puede decir que a menor porcentaje de vacíos del agregado mineral mayor contacto entre agregados existe y a mayor porcentaje de vacíos del agregado mineral menor puntos de contactos se presentan.

¹¹⁰ FUENTE: Elaboración Propia

Los datos maestres se ajustan a un modelo de regresión lineal de orden descendente, es decir la pendiente de la recta es negativa

Se observa que el porcentaje de vacíos del agregado mineral para una mezcla con agregado de tamaño máximo es de $\frac{3}{4}$ es mayor al 14%, y que para este valor el número de puntos de contactos no sobrepasa los 140.

3.6. ANÁLISIS DE NÚCLEOS (extraídos de campo)

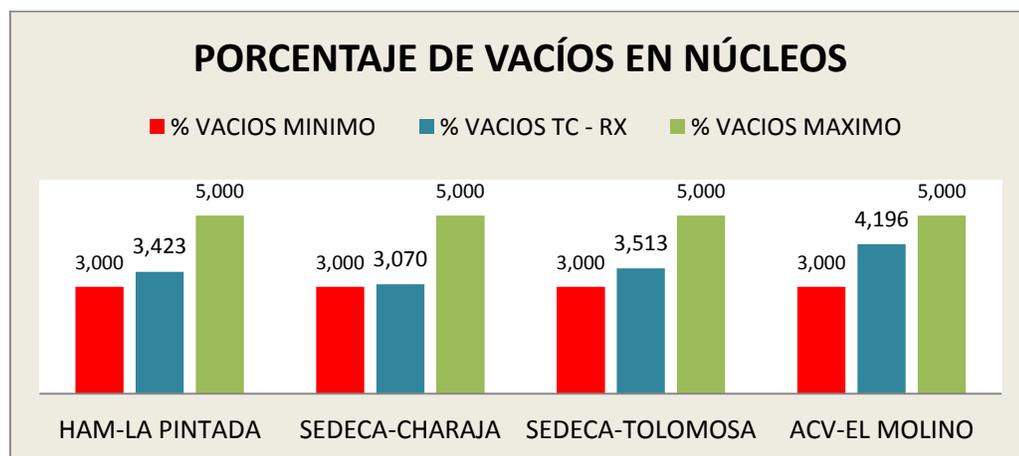
Se tienen los núcleos de las mezclas asfálticas producidas por las diferentes plantas asfálticas analizadas.

Los núcleos son extraídos a tres bolillos cada 150 m, para su determinación del % de vacíos y contacto de agregados mediante la medición por pixeles.

Para todos los casos se realiza un análisis estadístico de los datos determinando el valor medio y desviación estándar, para proceder a depurar los datos que se encuentren por encima o por debajo de la media, estableciendo un rango de admisión de muestra.

3.6.1. Porcentaje de Vacíos

Gráfica 1.8.24 Porcentaje de Vacíos en Núcleos¹¹¹



¹¹¹ FUENTE: Elaboración Propia

Realizando el análisis de la muestra de los núcleos del banco de datos HAM-LA PINTADA, extraídas del proyecto de pavimentación de la zona El Portillo (ingreso Nueva Terminal) se tiene un valor medio de vacíos 3,423% valor que se encuentra dentro del rango admisible por norma de 3% y 5% de vacíos.

La muestra presenta una desviación de 0,946 para los 600 m de carpeta asfáltica controlada, por lo que los valores admisibles para el porcentaje de vacíos son aquellos que se encuentre entre $3,423 \pm 0,946$ %.

Para la muestra de núcleos del banco de datos SEDECA-CHARAJA, extraídas del proyecto de pavimentación Chocloca (provincia Avilés), se tiene un valor medio de vacíos de 3.070% valor que se encuentra dentro del rango admisible por norma de 3% y 5% de vacíos.

La muestra presenta una desviación de 0,391 para los 600m de carpeta asfáltica controlada, por lo que los valores admisibles para el porcentaje de vacíos son aquellos que se encuentren entre $3,070 \pm 0,391$ %.

Analizando las muestras de núcleos del banco de datos SEDECA – TOLOMOSA, extraídas del proyecto de pavimentación de la comunidad de Erquis (provincia Méndez), se obtiene un valor medio de vacíos de 3,513% valor que se encuentra dentro del rango admisible por norma de 3% y 5% de vacíos.

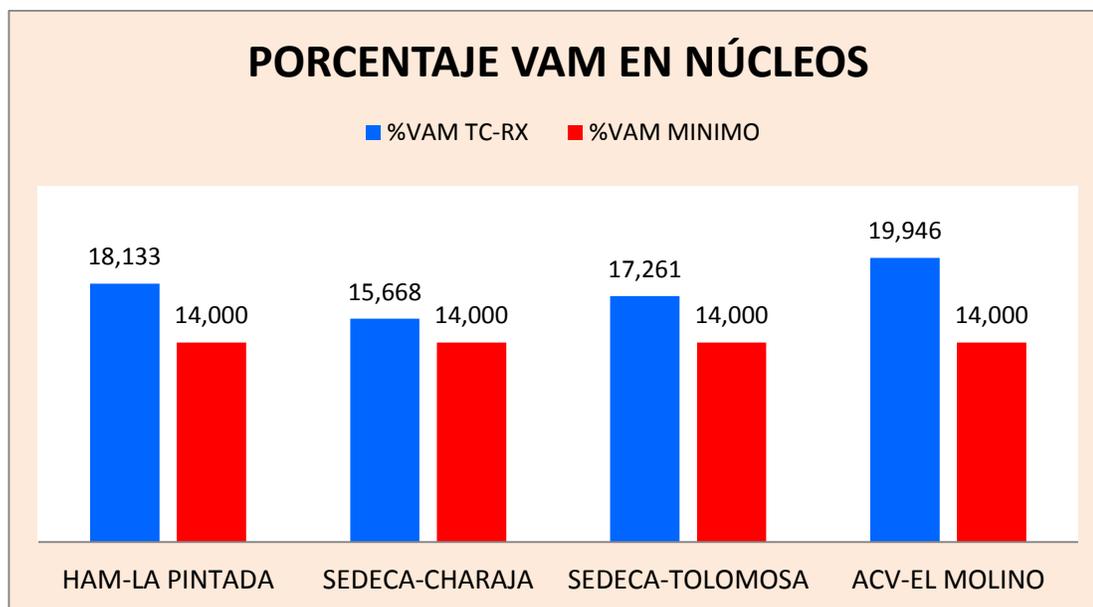
La muestra presenta una desviación estándar de 0,931 para los 600m de carpeta asfáltica controlada, por lo que los valores admisibles para el porcentaje de vacíos son aquellos que se encuentren entre $3,513 \pm 0,931$ %.

Así mismo analizando las muestras de núcleos del banco de datos ACV – EL MOLINO, extraídas del proyecto de pavimentación Copacabana (Zona Alta de Tarija), se obtiene un valor medio de vacíos de 4,196% valor que se encuentra dentro del rango admisible por norma de 3% y 5% de vacíos.

La muestra presenta una desviación estándar de 0,520 para los 600m de carpeta asfáltica controlada por lo que los valores admisibles par el porcentaje de vacíos son aquellos que se encuentran entre $4,196 \pm 0,520$ %.

3.6.2. Porcentaje de Vacíos del Agregado Mineral (VAM)

Gráfica 1.8.25 Porcentajes VAM en Núcleos¹¹²



Realizando el análisis los datos presentados de las muestras de núcleos del banco HAM-LA PINTADA, se obtiene un valor medio de VAM del 18,133%, valor que se encuentra por encima del valor mínimo de 14,000% especificado por la norma.

La muestra presenta una desviación estándar de 4,030 por lo que se clasifica como valor admisible a aquellos que se encuentren dentro del rango admisible, el cual es definido como $18,133 \pm 4,030$ % de VAM.

Analizando las muestras de núcleos del banco SEDECA - CHARAJA, se obtiene un valor medio de VAM del 15,668%, valor que se encuentra por encima del valor mínimo de 14,000% especificado por la norma.

La muestra presenta una desviación estándar de 2,892 por lo que se clasifica como valor admisible a aquellos que se encuentren dentro del rango admisible el cual es definido como $15,668 \pm 2,892$ % de VAM.

¹¹² FUENTE: Elaboración Propia

Para el análisis de las muestras de núcleos del banco SEDECA – TOLOMOSA, se obtiene un valor medio de VAM del 17,261 %, valor que se encuentra por encima del valor mínimo de 14,000% especificado por norma.

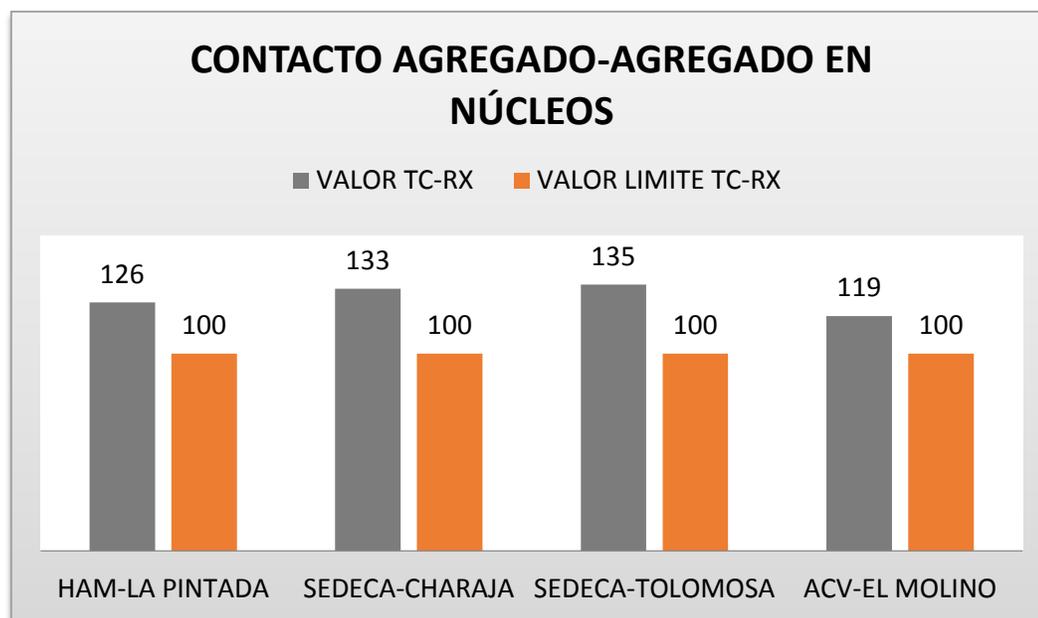
La muestra presenta una desviación estándar de 3,699 por lo que se clasifica como valores admisibles aquellos que se encuentren entre $17,261 \pm 3,699\%$ de VAM.

Procediendo al análisis de las muestras de núcleos del banco de datos ACV-EL MOLINO, se obtiene un valor medio de VAM del 19,946%, valor que se encuentra por encima del valor mínimo de 14,000% especificado por norma.

La muestra presenta una desviación estándar de 1,238 por lo que se clasifica como valores admisibles a aquellos que se encuentran dentro del rango admisible el cual es definido como $19,946 \pm 1,238 \%$ de VAM.

3.6.3. Contacto Agregado-Agregado

Gráfica 1.8.26 Puntos de Contacto Agregado-Agregado en Núcleos¹¹³



¹¹³ FUENTE: Elaboración Propia

Procediendo al análisis de contacto agregado-agregado en núcleos se observa que:

Para las muestras del banco de datos HAM-LA PINTADA el valor medio de puntos de contactos es de 126, con una desviación estándar de 6,693 por lo se aceptan como valores admisibles a aquellos que se encuentren dentro del rango $126 \pm 6,693$.

Para las muestras del banco de datos SEDECA-CHARAJA el valor medio de puntos de contactos es de 133, con una desviación estándar de 7,259 por lo se aceptan como valores admisibles a aquellos que se encuentren dentro del rango $133 \pm 7,259$.

Para las muestras del banco de datos SEDECA-TOLOMOSA el valor medio de puntos de contactos es de 135, con una desviación estándar de 8,050 por lo se aceptan como valores admisibles a aquellos que se encuentren dentro del rango $135 \pm 8,050$.

Para las muestras del banco de datos ACV-EL MOLINO el valor medio de puntos de contactos es de 119, con una desviación estándar de 7,956 por lo se aceptan como valores admisibles a aquellos que se encuentren dentro del rango $119 \pm 7,956$.

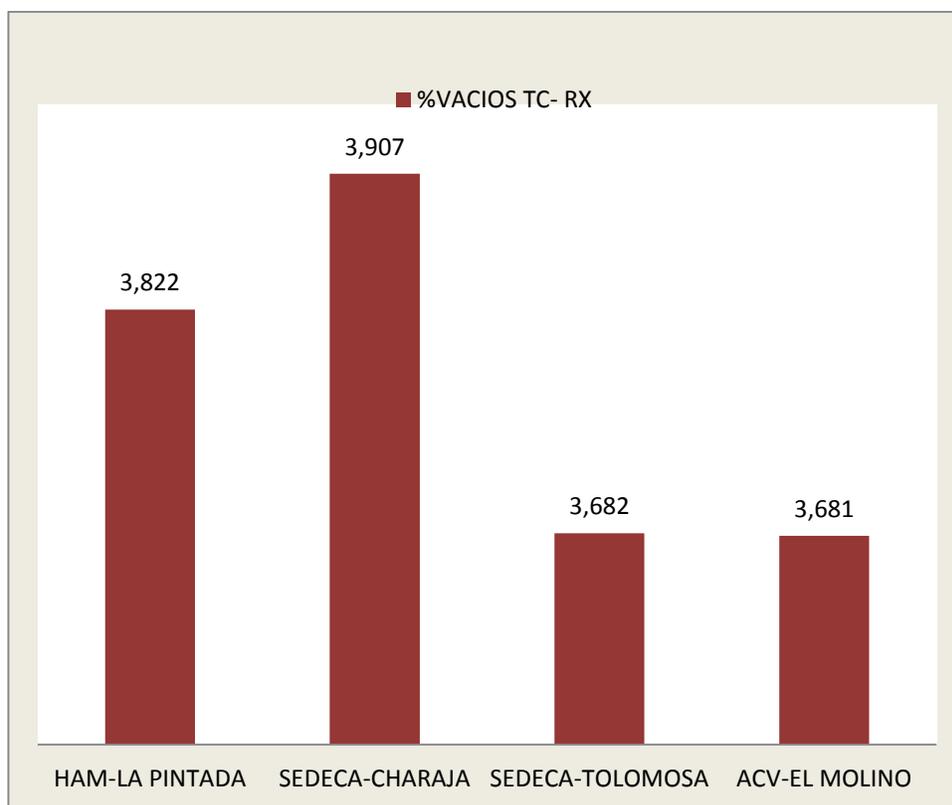
Habiendo analizado el comportamiento de las mezclas asfálticas diseñadas en laboratorio determinamos que el número de contactos agregado-agregado en ningún caso es menor a 100 puntos, por lo que se puede observar que en ningún caso de análisis de núcleos es menor a este valor.

CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Se verifica que los valores de porcentaje de vacíos en mezclas asfálticas densas efectivamente se encuentra entre 3 y 5%.
- Determinándose valores con TC-RX entre 3.5% – 4 %, en mezclas compactadas en condiciones ideales.

Gráfica 1.8.27 Porcentaje de Vacíos mediante TC-RX¹¹⁴

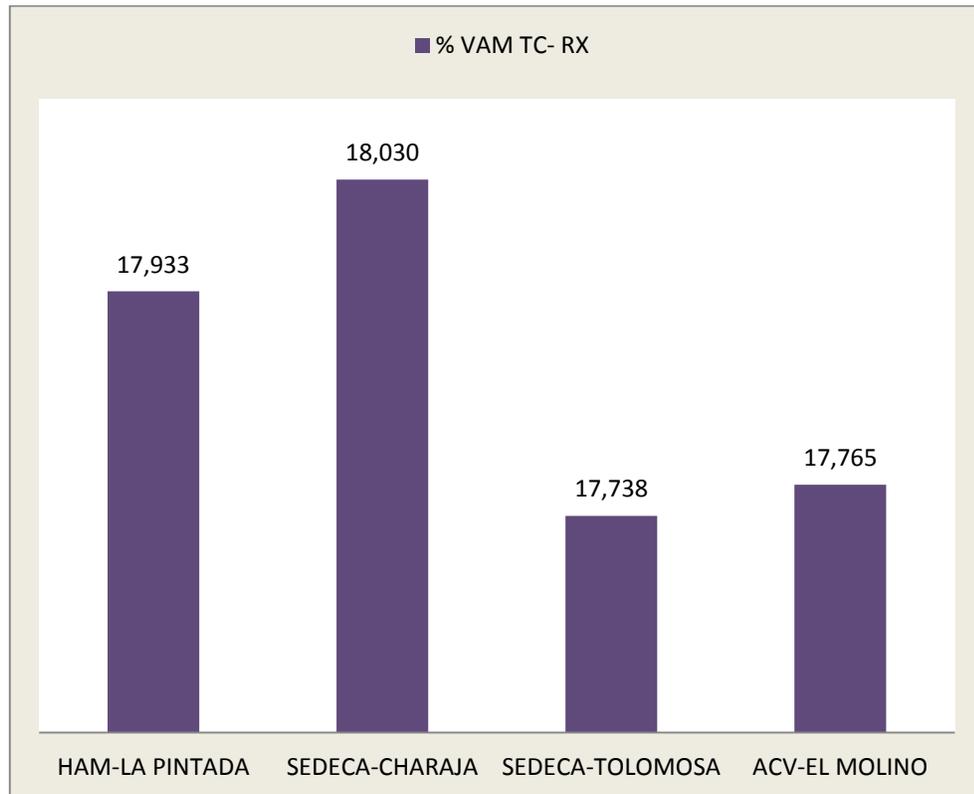


- Se observa que los valores de vacíos en briquetas de laboratorio y núcleos tienen una desviación de $\pm 25\%$, debido a que éstos se encuentran ya bajo la acción de las cargas de uso.

¹¹⁴ FUENTE: Elaboración Propia

- Se verifica que el porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM) en ningún caso para mezclas asfálticas cuyo tamaño máximo de agregado $\frac{3}{4}$ " es mayor a 25 pero si mayor a 14% como indica la norma.

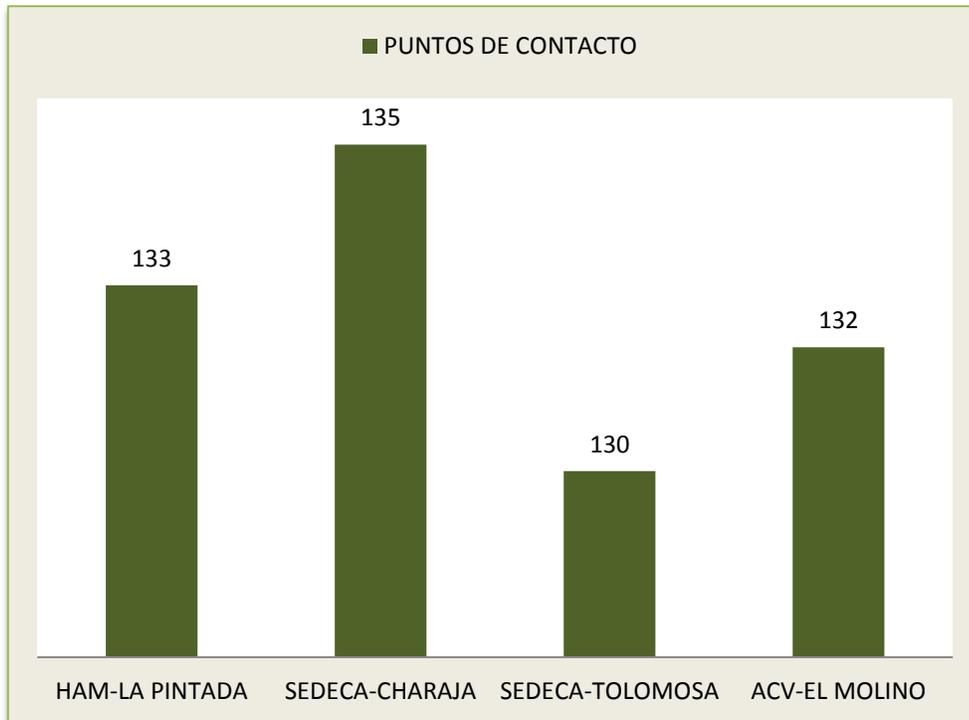
Gráfica 1.8.28 Porcentaje de VAM mediante TC-RX¹¹⁵



- Relacionando las variables VAM y VACIOS se determina que éstas son proporcionales entre sí a medida que aumenta el porcentaje de vacíos aumenta el porcentaje de vacíos del agregado mineral.
- El número de contactos agregado-agregado para mezclas densas son menor a 100 pero no mayor a 140 puntos para asfaltos 85/100 y 60/70, un valor menor a 100 significa que existe una película demasiado gruesa por lo que presentaría ondulaciones, ahuellamientos; y mayor 140 una película demasiado delgada por lo que presenta segregación de los agregados y exudaciones; en ambos limites la trabajabilidad de la mezcla se ve afectada.

¹¹⁵ FUENTE: Elaboración Propia

Gráfica 4.1.3 Puntos de Contacto Mediante TC-RX



- Relacionando el contacto agregado-agregado y el porcentaje de vacíos se determina que a mayor contacto entre agregados, menor porcentaje de vacíos se presenta.
- Relacionando el contacto agregado-agregado y el porcentaje VAM se determina que a mayor contacto entre agregados, menor es el valor del porcentaje de vacíos del agregado mineral que presenta la mezcla asfáltica.
- A mayor contacto entre agregados, la mezcla constituye una estructura cerrada siendo ésta poco o nada permeable, debido al bajo porcentaje de vacíos, lo cual representaría que la mezcla también presentaría problemas de dilatación y contracción, por efecto de temperatura.

4.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un control y sondeo de un proyecto desde su inicio para analizar la variación de los valores con respecto al tiempo y uso de la vía.

- Para poder tener un mayor ajuste probabilístico de datos se recomienda analizar una mayor cantidad de muestras.
- Para verificar la variación de los vacíos con el contenido de asfalto se recomienda realizar un análisis de TC-RX a las briquetas antes de ser sometidas a ensayos de estabilidad y fluencia, para así poder presenciar la variación de vacíos y de puntos de contactos durante su diseño.
- Para obtener valores de campo y laboratorio correctos se debe controlar la temperatura del compactado.
- Se recomienda la aplicación de ésta metodología por el grado de confiabilidad de los datos obtenidos, haciendo uso del avance tecnológico