

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

A lo largo de los años, el uso de tecnología, software, plataformas y procedimientos ha facilitado el desarrollo del proceso constructivo ya que producen procesos eficientes y efectivos en la obtención de resultados. Las mezclas asfálticas, son el pilar fundamental de la ingeniería en el área de vías de comunicación, por lo que han ido adoptando paulatinamente la práctica de diseñar y validar propiedades volumétricas y resistentes a través de prácticas innovadoras; como forma de evaluar el comportamiento del material cuando se pone en servicio en el pavimento, lo cual es fundamental para garantizar su fiabilidad y durabilidad importante. La extracción de núcleos de pavimento se ha utilizado como herramienta para verificar la calidad del producto terminado, y se debe tener en cuenta que esta práctica afecta de alguna manera a la capa asfáltica, sin mencionar que estos especímenes requieren tiempo, equipo y personal, se requieren para calcular y procesar los resultados, sin embargo, hoy en día se han desarrollado diferentes alternativas como la tomografía o software para el procesamiento de imágenes de la microestructura de la capa de asfalto que se pueden evaluar en función del tamaño de las partículas, la orientación de los agregados y el contacto de agregado a agregado; esto ahorra tiempo en el análisis de las propiedades físicas de los agregados y también proporciona un método alternativo para reducir los ensayos invasivos en el pavimento.

La TC (Tomografía Computarizada) se basa en la utilización de rayos-X para irradiar cuerpos y la cuantificación posterior de las diferencias de intensidad de radiación inicial y final, con base en las cuales es posible obtener imágenes digitales que pueden ser analizadas mediante software de análisis de imágenes o por inspección visual. Esencialmente, el equipo de TC consta de una fuente de emisión de rayos X y de un detector de intensidad. Mediante TC ha logrado centrar la atención de los ingenieros de pavimentos debido a que ofrece ventajas relacionadas con: su carácter de ensayo no destructivo, facilidad de uso, obtención rápida de resultados y confiabilidad y repetitividad.

1.2 Justificación

Los pavimentos con mezclas asfálticas tienen un déficit de adhesión entre sus agregados gruesos, si se lo compara con las muestras tradicionales, lo que los hace altamente sensibles a las fuerzas tangenciales producidas por el paso de los vehículos, especialmente en eventos de frenado. Esto se realiza con el fin de caracterizar mezclas asfálticas para garantizar diseños confiables, durables. Se produce un acomodamiento de partículas, porosidad, densidad que son diferentes a los de una mezcla asfáltica en campo.

Esta situación, causa que los pavimentos que contienen mezclas asfálticas desarrollen un fenómeno de desprendimiento de agregados superficiales bastante acelerado, el cual es conocido como raveling. Éste es un problema de la mezcla asociado a la calidad del contacto agregado-agregado el cual se ve afectado por la cantidad de cemento asfáltico, matriz y proporción de vacíos en la muestra. Los altos costos de rehabilitación y mantenimiento de los pavimentos con mezclas asfálticas han generado un interés creciente en, entender y dar solución al principal fenómeno de deterioro que afectan estos pavimentos; es decir, por entender, caracterizar y prevenir procesos de raveling. Para ello es necesario desarrollar de un modelo-micro mecánico donde se estudie el funcionamiento de las mezclas asfálticas. Dichos modelos requieren ser alimentados con datos cercanos a la realidad relacionados con la microestructura de las mezclas los que serán estudiados por TC obtenidos mediante análisis de imagen sobre muestras reproducidas en laboratorio. En este contexto, esta investigación cobra importancia, porque presenta una metodología que establece las directrices para la obtención de información real de la microestructura en términos de; su granulometría, la orientación de los agregados y contacto agregado-agregado, a partir de análisis de imágenes conseguidas mediante tomografía computarizada. Esta es fundamental para alimentar los modelos micro mecánicos con los que se pretenden llegar a una mejor comprensión del fenómeno de raveling. Las características geométricas de los agregados incluyen forma, angularidad y textura superficial. Estas propiedades se pueden definir considerando diferentes escalas con relación al tamaño de la partícula.

No es lo mismo dosificar en laboratorio que en campo interfiere el peso del martillo, el número de golpes, la temperatura y en campo los equipos vibratorios y neumáticos.

1.3 Situación problemática y problema

1.3.1 Situación problemática

Desde el principio de la historia, el hombre, en la necesidad por mantener un estado de vida óptimo, ha creado vías de comunicación para permitir la conexión de un sitio con otro. Actualmente, el planeta se encuentra interconectado por un importante sistema de carreteras y autopistas; para ello anualmente en el mundo, se construyen miles de kilómetros de vías pavimentadas con mezclas asfálticas en caliente, desde grandes autopistas múltiples a vías rurales de un solo carril.

Por más de 100 años, las mezclas asfálticas o mezclas de concreto asfáltico han sido uno de los materiales mayormente utilizados en la construcción del sistema vial; es por ello que los institutos viales conjuntamente con ingenieros, han realizado investigaciones para brindar métodos de diseño que reúnan condiciones de excelente calidad.

El problema llega a ser el poco estudio sobre la estructura interna dentro de la ingeniería lo que provocaba no conocer a tan detalladamente lo que existe dentro de la estructura del pavimento con mezcla asfáltica. Hoy en día la ingeniería de pavimentos ha implementado los TC para el análisis de la estructura interna de mezclas asfálticas. Dado los desarrollos logrados en los últimos años a partir de la TC donde se tiene como objetivo realizar una evaluación en la estructura interna de mezclas asfálticas.

La existencia de algunos asentamientos evidenciaba el tránsito de algunas cargas pesadas no evaluadas o que habían sido subestimadas y deficiencias de compactación en el terraplén de soporte por clara saturación de la subrasante. Los baches eran producto del deficiente sistema de drenaje, la piel de cocodrilo se consideraba consecuencia de una deficiente calidad del asfalto existente, un tráfico muy pesado el cual no puede ser soportado por el espesor de la capa asfáltica o el cumplimiento de la vida útil del mismo; grietas o fisuras menores por diversos factores como el clima, tráfico o materiales. Factores combinados que daban pie a la rehabilitación del sector en cuestión.

La causa más común aceptada de la fatiga por reflexión es la proveniente de los movimientos horizontales concentrados en las juntas y fisuras del pavimento existente, y se conoce como fisuración inducida térmicamente.

El estado de un pavimento puede ser cuantificado subjetivamente por medio de su nivel de servicio, el cual está ligado a su capacidad estructural y/o funcional. En el caso de

pavimentos rígidos con niveles de servicio bajos, este es recuperado utilizando métodos de rehabilitación que van desde la reconstrucción total de la estructura hasta la colocación de carpetas asfálticas que mejoran su transitabilidad. La colocación de sobre carpetas asfálticas resulta ser una alternativa frecuentemente utilizada en obras de rehabilitación; sin embargo, cuando estas mezclas asfálticas son colocadas directamente sobre las juntas del pavimento rígido o las fisuras de las losas, estas discontinuidades se reflejan en muy corto tiempo sobre la capa asfáltica nueva. El calcado de estas fisuras se genera por el movimiento de los bloques de la capa rígida debido a la acción conjunta de las cargas de los vehículos y los cambios ambientales. Este fenómeno se conoce como fatiga reflectiva o fatiga por reflexión por ser una extensión de las discontinuidades existentes en la capa rígida a rehabilitar.

1.3.2 Problema

¿Se podrá realizar el análisis mediante imágenes por TC aplicado a mezclas asfálticas para probetas densas, finas, abiertas y porosas o drenantes, para determinar su caracterización de tamaño y distribución de partículas?

1.4 Hipótesis

Si realizamos el estudio de análisis por imagen a probetas con mezclas asfálticas densas, finas, abiertas y porosas o drenantes entonces se podrá determinar su caracterización del tamaño y distribución de partículas.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Analizar la estructura interna de las mezclas asfálticas para determinar la caracterización y distribución de sus partículas mediante el análisis de imagen con tomografía computarizada.

1.5.2 Objetivos específicos

- ✓ Analizar el fundamento teórico de mezclas asfálticas en pavimentos flexibles.
- ✓ Analizar el procedimiento con tomografías computarizadas y análisis de imágenes para evaluar las mezclas asfálticas.
- ✓ Identificar la ubicación de los materiales para la elaboración de las probetas de asfalto.

- ✓ Caracterizar los materiales para la elaboración de las probetas de asfalto.
- ✓ Dosificación para la realización de las probetas asfálticas.
- ✓ Desarrollar las probetas con mezclas asfálticas de estudio.
- ✓ Establecer tomografías de imagen a las probetas con mezclas asfálticas de estudio.
- ✓ Evaluar la caracterización del tamaño y distribución de partículas a partir de las imágenes por tomografía.
- ✓ Realizar un análisis de resultados de las mezclas estudiadas.
- ✓ Establecer las conclusiones obtenidas mediante imágenes computarizadas por tomografía de las mezclas estudiadas.

1.6 Variables

1.6.1 Variable independiente

Mezclas asfálticas: Se define la mezcla asfáltica como la íntima combinación de unos áridos minerales y un ligante bituminoso (asfalto), de manera que todas las partículas del árido queden cubiertas en forma homogénea por una película del ligante.

1.6.2 Variable dependiente

Propiedades internas de mezclas asfáltica por imágenes: Las imágenes que se obtienen a partir de tomografía permiten conocer los elementos que conforman la mezcla asfáltica, su distribución y proporción, el estudio de estas se hace mediante el procesamiento de algoritmos computacionales.

1.7 Alcance

El presente trabajo tiene como finalidad estudiar la caracterización de tamaño y distribución de partículas para cuatro tipos de mezclas asfálticas para esto está la problemática si se podrá caracterizar el tamaño y su distribución mediante el análisis de imagen por tomografía computarizada. Ya que se puede conocer cómo ha evolucionado el estudio de las mezclas asfálticas mediante el análisis por imagen para su caracterización de tamaño y distribución de partículas en el transcurso de los años. También se busca definir por qué se está estudiando el análisis por imagen y que resultados se obtendrá mediante estos estudios.

Mediante la evaluación de la información sobre el fundamento teórico de mezclas asfálticas en pavimentos flexibles, y la información sobre el empleo de tomografías

computarizadas dentro de las mezclas asfálticas se podrá tener el conocimiento necesario para realizar de forma precisa el desarrollo de la caracterización y distribución de partículas mediante el análisis de imagen. Se podrá determinar qué tipo de errores se producen dentro de la aplicación de imágenes en las mezclas asfálticas.

Se determinará el tipo de unidad, la población, la muestra, el muestreo y el tipo de método y técnicas a utilizarse para la elaboración de las briquetas de mezclas asfálticas que serán llevadas a un centro de tomografía para su respectiva toma de imágenes las cuales serán evaluadas y elegir las que tenga mejor visibilidad donde se note mejor la caracterización y distribución del tamaño de agregado.

Con los resultados obtenidos se determinará la caracterización del tamaño y distribución de partículas, se deberá realizar un análisis de resultados comparativo de las mezclas estudiadas y al final se podrá concluir los resultados sobre caracterización de tamaño y distribución de partículas.

Esta investigación cobra importancia, debido a que presenta una metodología que establece las directrices para la obtención de información real de la microestructura en términos de su granulometría, la orientación de los agregados y contacto agregado-agregado, a partir de análisis de imágenes conseguidas mediante tomografía computarizada (TC) y herramientas petrográficas. Donde las TC son fundamental para el análisis de sus características de tamaño y distribución de partículas de las probetas de mezclas asfálticas estudiadas.

Como parte del desarrollo de la metodología para caracterizar las microestructuras de estas mezclas, se hicieron pruebas sobre muestras reales probetas de mezclas asfálticas densas, abiertas, finas y porosas o drenantes, con una composición granulométrica, porcentaje de asfalto y vacíos proporcionados por el tutor de proyecto de grado.

CAPÍTULO II

**ASPECTOS GENERALES DE
LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y
SU EVALUACIÓN A TRAVÉS
DE TOMOGRAFÍAS**

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y SU EVALUACIÓN A TRAVÉS DE TOMOGRAFÍAS

2.1 Pavimentos flexibles

La construcción de carreteras en pavimento flexible ha venido aumentada en el país, kilómetros de mezclas asfálticas se instalan con el fin de mejorar las vías de accesos permitiendo el desarrollo y seguridad por parte de los usuarios; teniendo en cuenta que las mezclas asfálticas se diseñan con un tiempo de vida útil, es muy importante contar con materiales cuyas características y composición cumplan con las especificaciones. (Acosta, 2017)

Por lo tanto, el concepto de pavimento flexible se define como una estructura compuesta por capas granulares (subbase, base) y como capa de rodadura una carpeta constituida con materiales bituminosos como aglomerantes, agregados y de ser el caso aditivo. Principalmente se considera como capa de rodadura asfáltica sobre capas granulares: mortero asfáltico, bicapa, micro pavimentos, mezclas asfálticas en frío y mezclas asfálticas en caliente. (Acosta, 2017)

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos: ser resistente a las cargas impuestas por el tránsito; ser resistente ante los agentes de intemperismo; presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos. Toda esta evaluación, análisis y diseño se realiza con ensayos de laboratorio que determinan los porcentajes de composición y la fórmula de trabajo en la cual va a estar inmersa la fabricación y control diario de la mezcla producida. (Acosta, 2017)

El pavimento flexible tiene como capa de rodadura una carpeta asfáltica cuyas principales funciones son:

2.1.1 Estructural

Esta capa debe estar diseñada y construida de tal forma que sea resistente a los fenómenos de fatiga y acumulación de las deformaciones permanentes inducidas por las cargas cíclicas vehiculares que se repiten en el tiempo. (F., 2020)

2.1.2 Funcional

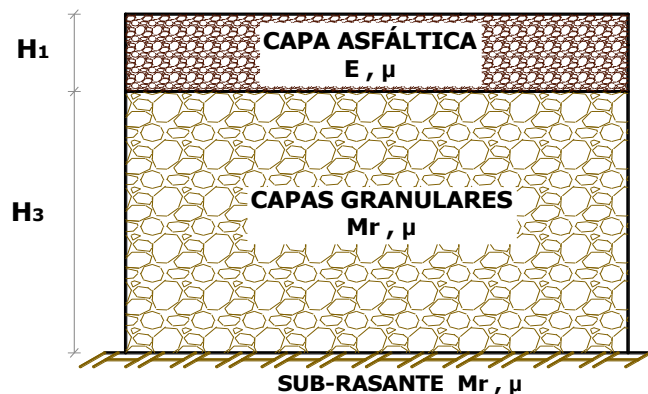
Esta capa recibe de manera directa las cargas que circulan sobre la superficie del pavimento, por lo tanto, debe estar diseñada y construida de tal manera que permita la circulación cómoda y segura del parque automotor durante su vida útil. (F., 2020)

2.1.3 Impermeabilización

Esta capa impide la penetración directa del agua a las capas subyacentes, restringiendo la pérdida de resistencia al corte que pueden experimentar las capas granulares de base y sub base, así como la subrasante cuando se incrementa el grado de saturación de los materiales que la conforman. (F., 2020)

De acuerdo a la Ingeniería, el pavimento es un elemento estructural que se encuentra apoyado en toda su superficie sobre el terreno de fundación llamado subrasante. Esta capa debe estar preparada para soportar un sistema de capas de espesores diferentes, denominado paquete estructural, diseñado para soportar cargas externas durante un determinado período de tiempo. Ver figura 2.1.

Figura 2.1 Paquete estructural



Fuente: (Bastidas, 2004)

Clasificación de pavimentos, los pavimentos flexibles están constituidos por las siguientes capas: carpeta asfáltica, base, subbase y subrasante. A continuación, se explica a detalle cada uno de estos elementos.

2.1.4 Carpeta Asfáltica.

La carpeta asfáltica es la capa que se coloca en la parte superior del paquete estructural, sobre la base, y es la que le proporciona la superficie de rodamiento a la vía. Cumple la función de impermeabilizar la superficie evitando el ingreso de agua que podría saturar

las capas inferiores. También evita la desintegración de las capas subyacentes y contribuye al resto de capas a soportar las cargas y distribuir los esfuerzos (cuando se construye con espesores mayores a 2.5 cm.). (Velásquez, 2009)

2.1.4.1 Base

Es la capa de pavimento ubicada debajo de la superficie de rodadura y tiene como función primordial soportar, distribuir y transmitir las cargas a la subbase, que se encuentra en la parte inferior. (Velásquez, 2009)

La base puede estar constituida principalmente por material granular, como piedra triturada y mezcla natural de agregado y suelo; pero también puede estar conformada con cemento Portland, cal o materiales bituminosos, recibiendo el nombre de base estabilizada. Éstas deben tener la suficiente resistencia para recibir la carga de la superficie y transmitirla hacia los niveles inferiores del paquete estructural. (Velásquez, 2009)

2.1.4.2 Subbase

La subbase se localiza en la parte inferior de la base, por encima de la subrasante. Es la capa de la estructura de pavimento destinada a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas en la carpeta asfáltica. Está conformada por materiales granulares, que le permiten trabajar como una capa de drenaje y controlador de ascensión capilar de agua, evitando fallas producidas por el hinchamiento del agua, causadas por el congelamiento, cuando se tienen bajas temperaturas. Además, la subbase controla los cambios de volumen y elasticidad de material del terreno de fundación, que serían dañinos para el pavimento. (Velásquez, 2009)

2.1.4.3 Subrasante

La subrasante es la capa de terreno que soporta el paquete estructural y que se extiende hasta una profundidad en la cual no influyen las cargas de tránsito. Esta capa puede estar formada en corte o relleno, dependiendo de las características del suelo encontrado. Una vez compactada, debe tener las propiedades, secciones transversales y pendientes especificadas de la vía. (Velásquez, 2009)

El comportamiento estructural de un pavimento frente a cargas externas, varía de acuerdo a las capas que lo constituyen. La principal diferencia entre el comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos es la forma cómo se reparten las cargas. Ver figura 2.2 (Bastidas, 2004)

Figura 2.2 Comportamiento del pavimento frente a cargas de tránsito.



Fuente: (Bastidas, 2004)

2.1.4.3.1 Fallas en pavimentos urbanos flexibles

Las fallas son el resultado de interacciones complejas de diseño, materiales, construcción, tránsito vehicular y medio ambiente. Estos factores combinados, son la causa del deterioro progresivo del pavimento, situación que se agrava, al no darle un mantenimiento adecuado a la vía. (Rodríguez, 2004)

Existen dos tipos de fallas: estructurales y funcionales. Las primeras, son las que originan un deterioro en el paquete estructural del pavimento, disminuyendo la cohesión de las capas y afectando su comportamiento frente a cargas externas. Las fallas funcionales, en cambio, afectan la transitabilidad, es decir, la calidad aceptable de la superficie de rodadura, la estética de la pista y la seguridad que brinda al usuario. (Rodríguez, 2004)

Para pavimentos flexibles los daños pueden ser agrupados en 4 categorías:

- ✓ Fisuras y grietas;
- ✓ Deformaciones superficiales;
- ✓ Desintegración de pavimentos o desprendimientos;
- ✓ Afloramientos y otras fallas.

Los diseños de mezcla asfáltica son realizados por lo general por dos métodos: El Marshall, que está basado en la estabilidad de la mezcla y su contenido de vacíos, y la metodología Superpave que está basada en el contenido de vacíos. (Acosta, 2017)

2.2 Asfalto

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

El asfalto posee características tanto químicas como físicas, que son los elementos que le proveen todas sus particularidades y hacen de éste el producto esencial que es hoy en la industria de la construcción. Este cementante contiene tres importantes propiedades químicas: consistencia, pureza y seguridad, donde la primera se debe a su habilidad para fluir a diferentes temperaturas, esto en razón a que el asfalto es un material termoplástico, es decir, se fluidifica a altas temperaturas. La segunda define la composición química del asfalto, donde las impurezas de éste, son prácticamente inertes. La tercera precisa el comportamiento de afinidad química con las diferentes cargas eléctricas.

2.2.1 Tipos de asfaltos y usos

2.2.1.1 Cementos asfálticos

Este se obtiene, por destilación del crudo del petróleo mediante diferentes técnicas de refinación. El producto obtenido en los fondos de la torre de vacío luego de procesos de destilación por unidades primarias y de vacío, es el cemento asfáltico de petróleo, de consistencia semisólida a temperatura ambiente.

A temperatura ambiente el cemento asfáltico es negro, pegajoso, semisólido y altamente viscoso. Este es resistente y durable con excelente adhesividad y características a prueba de agua, altamente resistente a la acción de ácidos, álcalis y sales. El cemento asfáltico se usa en grandes cantidades, para la producción de Mezclas Asfálticas en Caliente (HMA), primordialmente usado en la construcción de pavimentos flexibles en todo el mundo.

El cemento asfáltico puede ser mezclado con agregados para la producción del HMA, su propiedad de adhesividad facilita la unión con el agregado que después de poner a temperatura ambiente, el HMA es un muy fuerte material de pavimento que puede soportar el tráfico pesado.

Tres métodos basados en su penetración, viscosidad o comportamiento se usan para clasificar el cemento asfáltico en diferentes grados. El grado de penetración del cemento asfáltico se especifica en ASTM D-946, con cinco penetraciones estándares, 40-50, 60-70, 85-100, 120-150, 200-300. (Ordoñez, 2001)

El ensayo de penetración mide la penetración de una aguja estándar dentro de un cemento para pavimentación bajo cierta temperatura, tiempo y carga.

El segundo método para clasificación el cemento asfáltico es por el grado de viscosidad, especificado en ASTM D-3381.

Las especificaciones para Cemento Asfáltico son aquellas que cumplen con propiedades normadas por la ASTM Requirements for Penetration Graded Asphalt Cements, tabla N° 2.1.

Tabla 2.1 Especificaciones para Cementos Asfálticos.

	Grado de Penetración									
	40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
	Min	Máx.	Min	Máx.	Min	Máx.	Min	Máx.	Min	Máx.
Penetración a 77°F (25C), 100 g, 5s	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de Inflamación, °F (Copa Abierta Cleveland)	450		450		450		425		350	
Ductilidad a 77°F, (25C), 5 cm/min, cm	100		100		100		100		100	
Solubilidad en Tricloroetileno, %	99.0		99.0		99.0		99.0		99.0	
Penetración retenida luego del ensayo de Película Delgada, %	55+		52+		47+		42+		37+	
Ductilidad a 77°F (25C), 5 cm/min, luego del ensayo de Película Delgada, cm			50		75		100		100*	

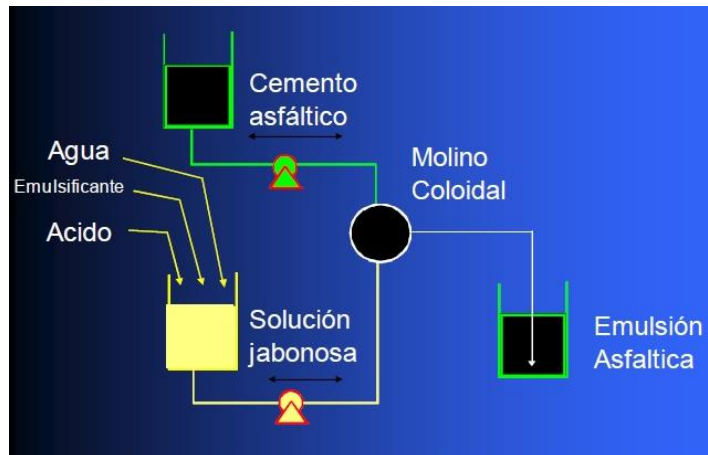
* Si la ductilidad a 77°F (25C) es menor que 100 cm, el material será aceptado si la ductilidad a 60F (15.5°C) es como mínimo 100 cm de la razón sacada de 5 cm/min.

Fuente: Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. National Center for Asphalt Technology 1996, Página 36

2.2.1.2 Emulsiones asfálticas

La emulsión asfáltica (también llamada emulsión) es una mezcla de cemento asfáltico, agua y agente emulsificante.

Figura 2.3 Composición con emulsión asfáltica



Fuente: (Ordoñez, 2001)

Las emulsiones se preparan para reducir la viscosidad del asfalto pudiendo aplicarse en zonas con bajas temperaturas. Los dos tipos comúnmente usados de emulsiones asfálticas se especifican en ASTM D977 y ASTM D2397:

- ✓ Aniónicas
- ✓ Catiónicas

La elección y usos de las emulsiones asfálticas se dan en ASTM D3628. Generalmente, se emplean como sigue:

- ✓ Emulsión de Rotura Rápida: tratamiento superficial y macadams de penetración;
- ✓ Emulsión de Rotura Media: mezclas asfálticas en frío de gradación abierta;
- ✓ Emulsión de Rotura Lenta: riego de liga, fog seal, mezclas asfálticas en frío de gradación densa, y slurry seal.

2.2.1.3 Asfaltos diluidos

Los Asfaltos diluidos son producto de la adición de algún destilado del petróleo al cemento asfáltico, resultando menos viscoso y por ello aplicable en zonas de baja temperatura. El solvente se pierde por evaporación quedando el cemento asfáltico sobre la superficie luego de su aplicación. Se dividen en tres tipos:

- ✓ Curado Rápido (RC) – producto de la adición de un diluyente ligero de alta volatilidad (generalmente gasolina o nafta) en el cemento asfáltico. Se usa principalmente como capa ligante y tratamiento superficial.
- ✓ Curado Medio (MC) – producto de la adición de un diluyente medio de volatilidad intermedia (generalmente kerosene) al cemento asfáltico.
- ✓ Curado Lento (SC) – producto de la adición de aceites de baja volatilidad (generalmente Diesel u otros gases aceitosos) en el cemento asfáltico.

2.3 Mezcla asfáltica

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de firmes, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a la explanada para que sean soportadas por ésta. (Rodríguez, 2004)

Se tienen que considerar dos aspectos fundamentales en el diseño y proyecto de un firme: La Función Resistente, que determina los materiales y los espesores de las capas que habremos de emplear en su construcción. (Rodríguez, 2004)

La Finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores del firme, para que resulten seguras y confortables. A estas capas superiores se le denomina pavimento. (Rodríguez, 2004)

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material. (Rodríguez, 2004)

Las cualidades funcionales del firme residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como (Rodríguez, 2004):

- ✓ La adherencia del neumático al firme.
- ✓ Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
- ✓ El desgaste de los neumáticos.
- ✓ El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.

- ✓ La comodidad y estabilidad en marcha.
- ✓ Las cargas dinámicas del tráfico.
- ✓ La resistencia a la rodadura (consumo de carburante).
- ✓ El envejecimiento de los vehículos.
- ✓ Las propiedades ópticas.

Estos aspectos funcionales del firme están principalmente asociados con la textura y la regularidad superficial del pavimento. (Rodríguez, 2004)

2.3.1 Definición de Mezcla Asfáltica.

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráfico pesados intensos. (Rodríguez, 2004)

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total. (Rodríguez, 2004)

2.3.2 Clasificación de las Mezclas Asfálticas según sus características

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas (Rodríguez, 2004):

2.3.2.1 Por Fracciones de agregado pétreo empleado.

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

2.3.2.2 Por la Temperatura de puesta en obra.

- ✓ **Mezclas asfálticas en Caliente:** Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores al ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente. (Rodríguez, 2004)
- ✓ **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. (Rodríguez, 2004)

2.3.2.3 Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica.

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas (Rodríguez, 2004).

- ✓ **Mezclas Cerradas o Densas:** La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- ✓ **Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas:** La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- ✓ **Mezclas Abiertas:** La proporción de vacíos supera el 12 %.
- ✓ **Mezclas Porosas o Drenantes:** La proporción de vacíos es superior al 20 %.

2.3.2.4 Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.

- ✓ **Mezclas Gruesas:** Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- ✓ **Mezclas Finas:** También llamadas 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 al triple del tamaño máximo.

2.3.2.5 Por la Estructura del agregado pétreo.

- ✓ **Mezclas con Esqueleto mineral:** Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan

concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.

- ✓ **Mezclas sin Esqueleto mineral:** No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas. (Rodríguez, 2004)

2.3.2.6 Por la Granulometría.

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

2.3.3 Propiedades de las mezclas asfálticas para capas de rodadura.

La capa superior de un pavimento es la que debe proporcionar una superficie de rodadura segura, confortable y estética. Como todas las exigencias deseables para una superficie de rodadura no pueden optimizarse simultáneamente hay que equilibrar las propiedades contrapuestas para llegar a las soluciones más satisfactorias.

Los materiales asfálticos proporcionan superficies continuas y cómodas para la rodadura de los vehículos. No obstante, hay que establecer un balance entre la durabilidad, rugosidad, impermeabilidad, y otras características útiles o imprescindibles para el usuario. Por ejemplo, en los países fríos, en particular en el centro de Europa, se han desarrollado mezclas muy impermeables y ricas en mortero. Si estas mezclas no proporcionan la textura adecuada, se recurre a procedimientos ajenos a la propia mezcla como son la incrustación en la superficie de gravillas o al abujardado en caliente.

En las capas de rodadura el uso de agregados de alta calidad y de aditivos se justifica por las solicitudes a que están sometidas. Actualmente la modificación de ligantes se ha generalizado para carreteras importantes persiguiéndose la optimización de la respuesta mecánica y de la durabilidad de la mezcla. Por la misma razón, la calidad de los agregados es absolutamente imprescindible, aunque todo ello suponga un costo mayor para el pavimento. (Rodríguez, 2004)

2.3.3.1 Estabilidad

Estabilidad puede definirse como la resistencia al desplazamiento. No hay una prueba aceptada universalmente para determinar la resistencia de una mezcla para pavimentos, y

todas las que se usan son más o menos empíricas. Ciertas pruebas de estabilidad manifiestan más la influencia del aglutinante asfáltico que la del agregado mineral o viceversa, como puede apreciarse en las pruebas Marshall y Hveem. Debe observarse que las pruebas de estabilidad deben suplementarse con otras. En la prueba Marshall, la deformación de la briqueta de ensayo se considera también para estimar la resistencia, y en la prueba Hveem los resultados del cohesiómetro suplementan los valores de estabilidad. El motivo de que, en ambas pruebas, Marshall y Hveem, se hayan hecho una tentativa para presentar la influencia relativa del asfalto y del agregado, es una indicación de tal necesidad. (Acosta, 2017)

✓ **Efecto del asfalto en la estabilidad**

Cantidad de Asfalto. - Dependiendo de su cantidad en la mezcla, el asfalto puede actuar como un ligante o como un lubricante. Por lo tanto, la estabilidad de una mezcla aumenta con un incremento en el porcentaje de asfalto hasta que se alcanza un máximo, después del cual disminuye. Si un agregado se ensaya con varios porcentajes de asfalto por medios de diferentes pruebas de estabilidad, la estabilidad máxima no siempre ocurrirá exactamente en el mismo porcentaje de asfalto, ni la forma de las curvas será la misma ya que algunas pueden ser menos pronunciadas que otras. La explicación está en el método de compactación, la rata de carga, y las dimensiones relativas de las briquetas. Considerando que todas estas pruebas son empíricas, sus interpretaciones tienen que basarse en la correlación con su comportamiento en el terreno. Es evidente que hay necesidad de una prueba que determine la estabilidad de una mezcla en términos de la carga por unidad de área en ratas prácticas de carga, pero independiente de la densidad original de las briquetas. (Acosta, 2017)

✓ **Características del asfalto**

Las características del asfalto, especialmente su consistencia, afectan los resultados de las pruebas de estabilidad. La viscosidad del asfalto entra en juego cuando la rata de carga es muy rápida. En la prueba Marshall, el grado del asfalto, tiene un gran efecto en la estabilidad, pero muy poco en el índice de flujo. En este caso particular, la estabilidad es casi el doble cuando un asfalto de penetración 85/100 sustituye el asfalto de penetración 150/200. Sin embargo, con asfaltos de fuentes diferentes o producidos por distintos

métodos de refinación, las diferencias entre el mismo grado de asfalto no son apreciables. (Acosta, 2017)

✓ **Efecto del agregado mineral en la estabilidad**

Tamaño Máximo de los Agregados. - En general, a medida que el tamaño del agregado aumenta, la estabilidad aumenta. Por razones de trabajabilidad y apariencia superficial, el tamaño máximo es generalmente limitado a $\frac{3}{4}$ pulgada, para concreto asfáltico. Cuando el tamaño máximo del agregado grueso se aumenta, generalmente su cantidad también aumenta, afectando la estabilidad en la misma tendencia. Cuando el porcentaje de agregado grueso es menor de 25%, el tamaño máximo tiene poca influencia en la estabilidad. (Acosta, 2017)

✓ **Efecto de la densidad de la mezcla en la estabilidad**

La densidad de una mezcla afecta la mayoría de las pruebas de estabilidad de que disponemos, pero la estabilidad máxima no ocurre siempre a la densidad máxima determinada antes de la prueba. Un estado más denso puede ocurrir durante la aplicación de la carga, o el porcentaje de asfalto que produce densidad máxima puede tener un gran efecto lubricante. Además, la temperatura en la cual se determinan la densidad y la estabilidad no es generalmente la misma. (Acosta, 2017)

2.3.3.2 Durabilidad

La durabilidad comprende todas las características que conducen a la larga vida. Ellas son: resistencia del asfalto a endurecerse durante la operación de mezcla, resistencia al efecto abrasivo del tránsito, resistencia del pavimento a la acción destructiva del aire, agua y a los cambios de temperatura. El término también implica flexibilidad suficiente para resistir roturas bajo las aplicaciones de carga y sus repeticiones. (Acosta, 2017)

✓ **Efecto del asfalto en la durabilidad**

El asfalto ejerce quizás, más influencias en la durabilidad que en cualquier otra característica del pavimento. El asfalto no es solamente el agente ligante, sino también el impermeabilizado y cumplirá sus funciones durante el tiempo que tenga y conserve sus correctas propiedades. Cuando un asfalto se calienta para cubrir con una delgada película el agregado mineral, ocurre oxidación y el asfalto se endurece. El endurecimiento total se mide, generalmente, por la pérdida en penetración. (Acosta, 2017)

2.4 Mezclas asfálticas densas

El diseño de mezclas de concreto asfáltico consiste en el estudio detallado de las características físicas de los agregados pétreos y de los materiales asfálticos para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico. Este último debe garantizar la correcta interacción de los materiales constituyentes de la mezcla en términos volumétricos y de resistencia. Altos contenidos de asfalto en la mezcla pueden contribuir al problema de exudación y, consecuentemente, ahuellamiento en el desempeño de la vida útil del pavimento. En sentido contrario, un bajo porcentaje de asfalto origina separación o desagregación de la mezcla asfáltica en servicio, con lo cual, se pueden desarrollar diferentes patologías en el pavimento (por ejemplo: stripping, pérdida de resistencia al daño por humedad, envejecimiento prematuro, entre otras). (Bastidas Martínez, 2020)

2.4.1 Agregados

Los agregados pétreos y la llenante mineral para la elaboración de la mezcla densa en frío deberán cumplir los requisitos establecidos. Los agregados pétreos no serán susceptibles de ningún tipo de meteorización o alteración fisicoquímica apreciable bajo las condiciones más desfavorables que presumiblemente se puedan dar en la zona de empleo. Tampoco podrán dar origen, con el agua, a disoluciones que puedan causar daños a estructuras o a otras capas del pavimento, o contaminar corrientes de agua. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.4.2 Material bituminoso

Será una emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta, de los tipos CRL-1 o CRL-1h, que cumpla los requisitos de calidad establecidos y que sea compatible con los agregados pétreos por emplear. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

Tabla 2.2 Especificaciones para Gradaciones Densas ASTM D3515

Tamiz	Mezcla Densa								
	Tamaño máximo nominal de agregados								
	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16
Gradación de agregados (grava; fino y filler si se requiere)									
Porcentaje en peso									
2 ½" (63mm)	100	-	-	-	-	-	-	-	-
2" (50mm)	90-100	100	-	-	-	-	-	-	-
1 ½" (37.5mm)	-	90-100	100	-	-	-	-	-	-
1" (25.0mm)	60-80	-	90-100	100	-	-	-	-	-
¾" (19.0mm)	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-	-
1/2" (12.5mm)	35-65	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-
3/8" (9.5mm)	-	-	-	56-80	-	90-100	100	-	-
Nº4 (4.75mm)	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85	80-100	-	100
Nº8 (2.36mm)	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	65-100	-	95-100
Nº16 (1.18mm)	-	-	-	-	-	-	40-80	-	85-100
Nº30 (600µm)	-	-	-	-	-	-	25-65	-	70-95
Nº50 (300µm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	-	45-75
Nº100 (150µm)	-	-	-	-	-	-	3-20	-	20-40
Nº200 (75µm)	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10	-	9-20

Fuente: (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.5 Mezclas asfálticas abiertas

Este trabajo consiste en la elaboración, transporte, colocación y compactación de una capa de mezcla asfáltica de tipo abierto, preparada y colocada en caliente, de acuerdo con esta especificación y de conformidad con los alineamientos, cotas, secciones y espesores indicados en los planos o determinados por el Interventor. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.5.1 Agregados

Los agregados pétreos no serán susceptibles de ningún tipo de meteorización o alteración fisicoquímica apreciable bajo las condiciones más desfavorables que presumiblemente se puedan dar en la zona de empleo. Tampoco podrán dar origen, con el agua, a disoluciones que puedan causar daños a estructuras o a otras capas del pavimento, o contaminar corrientes de agua. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

Los agregados pétreos no serán susceptibles de ningún tipo de meteorización o alteración físico-química apreciable bajo las condiciones más desfavorables que presumiblemente se puedan dar en la zona de empleo. Tampoco podrán dar origen, con el agua, a disoluciones que puedan causar daños a estructuras o a otras capas del pavimento, o contaminar corrientes de agua.

El Constructor, como responsable de los materiales que suministre para la ejecución de los trabajos, deberá realizar todos los ensayos necesarios para establecer la calidad e inalterabilidad de los agregados por utilizar, independiente y complementariamente de los que taxativamente se exigen en estas especificaciones. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

Los agregados se deberán ajustar a alguna de las gradaciones indicadas en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Gradaciones para mezclas asfálticas abiertas en caliente

Mezcla asfáltica abierta						
Tamices	Tamaño	Especificaciones ASTM D3515		Especificaciones con tolerancia ASTM D3515		Tolerancia de Gradación ASTM D3515
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
1½"	37,50	100	100	100	100	± 8
1"	25,4	75	100	75	100	± 8
¾"	19,0	60	85	60	93	± 8
½"	12,5	-	-	-	-	
⅜"	9,50	40	65	40	72	± 7

Mezcla asfáltica abierta (continuación)						
Tamices	Tamaño	Especificaciones ASTM D3515		Especificaciones con tolerancia ASTM D3515		Tolerancia de Gradación ASTM D3515
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
1/4"	6,35	-	-	-	-	
Nº4	4,75	30	50	30	57	± 7
Nº8	2,36	20	35	20	41	± 6
N.º 10	2,00	-	-	-	-	
Nº30	0,60	5	20	5	25	± 5
N.º 40	0,43	-	-	-	-	
Nº50	0,30	3	12	3	17	± 5
Nº100	0,15	2	8	2	13	± 5
Nº200	0,075	0	4	0	8	± 4
Base	-	-	-	-	-	

Fuente: Elaboración propia

Durante el proceso de compactación de la mezcla se deberá aplicar un sello de arena para evitar la adhesión de las llantas de los vehículos, debido a la presencia de fluidificantes en la emulsión asfáltica. La arena será natural, proveniente de trituración o una mezcla de ambas; estará exenta de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras materias objetables. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.6 Mezclas asfálticas finas

Las mezclas asfálticas hacen referencia a la combinación entre ligante asfáltico y agregados, pero esto sólo en lo que corresponde a su análisis en masa, debido a que se conoce que desde el punto de vista volumétrico se debe tener presente el porcentaje de la muestra que van a estar ocupados por los vacíos. A continuación, se presenta la Tabla 2.8 con los valores más comunes respecto a la distribución en masas y volúmenes al interior de una mezcla asfáltica sin modificar. (Martínez, 2017)

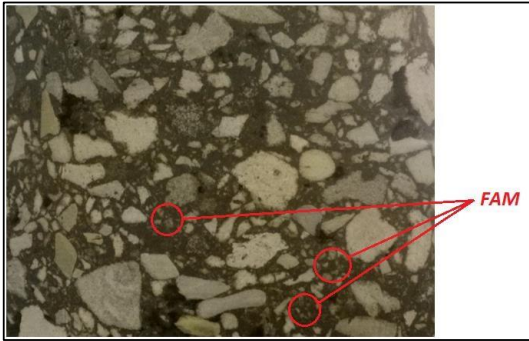
Tabla 2.4 Valores comunes de una Mezcla Asfáltica Fina

Materiales	Porcentaje en Masa	Porcentaje en Volumetría
Asfalto	5%	10%
Agregados	95%	85%
Vacíos	0%	5%

Fuente: (Instituto Nacional de Vías, 2022)

Ahora, es relevante aclarar el concepto que va a ser el gran diferenciador respecto a la magnitud de la mezcla asfáltica que se ensayó, ya que este proyecto solo analizó la FAM de la misma. Como se observa en la Figura 2.4, la Matriz Fina de Mezclas Asfálticas (por sus siglas en inglés FAM) es parte de una mezcla asfáltica completa: sólo está compuesta por el ligante asfáltico y los agregados cuyo máximo tamaño de partícula corresponde a aquellos que son capaces de pasar por el tamiz número 16 partículas con un tamaño superior a 1,18 milímetros, es decir, que la totalidad de los agregados deben ser capaces de pasar por el tamiz número 16. (Martinez, 2017)

Figura 2.4 Ubicación de la Matriz Asfáltica Fina en una Mezcla Asfáltica



Fuente: (Martinez, 2017)

Tabla 2.5 Gradación mezcla asfáltica fina (FAM)

Mezcla asfáltica fina						
Tamices	Tamaño	Especificaciones ASTM D3515		Especificaciones con tolerancia ASTM D3515		Tolerancia de Gradación ASTM D3515
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
1½"	37,50	100	100	100	100	± 8
1"	25,4	80	100	80	100	± 8
¾"	19,0	70	90	70	98	± 8
½"	12,5	-	-	-	-	
3/8"	9,50	55	75	55	82	± 7
¼"	6,35	-	-	-	-	
Nº4	4,75	45	62	45	69	± 7
Nº8	2,36	35	50	35	56	± 6
N. º10	2,00				-	

Mezcla asfáltica fina (continuación)						
Tamices	Tamaño	Especificaciones ASTM D3515		Especificaciones con tolerancia ASTM D3515		Tolerancia de Gradación ASTM D3515
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
Nº30	0,60	19	30	19	35	± 5
N.º40	0,43				-	
Nº50	0,30	13	23	13	28	± 5
Nº100	0,15	7	15	7	20	± 5
Nº200	0,075	0	8	0	12	± 4
BASE	-	-	-	-	-	

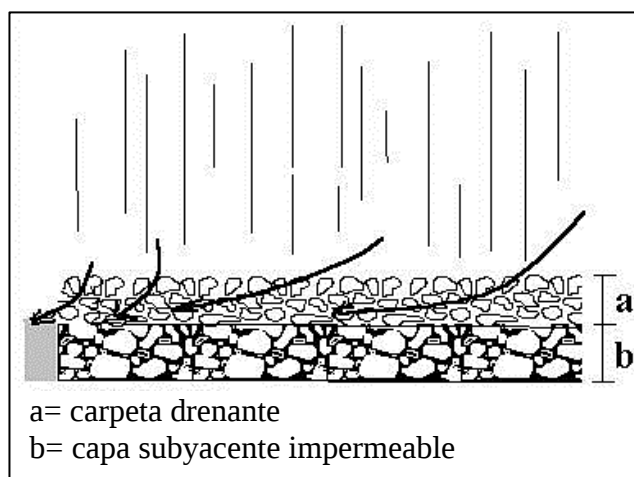
Fuente: (Instituto Nacional de Vías, 2022)

Respecto al porcentaje de vacíos al interior de la matriz fina de la mezcla asfáltica, se tomó la decisión de evaluar un porcentaje 10%, para lo cual fue fundamental la participación activa de la asesora del proyecto de grado. A continuación, se describen los materiales que se usaron para la fabricación de los especímenes a ensayar. (Martinez, 2017)

2.7 Mezclas asfálticas porosas o drenantes

Las mezclas drenantes o porosas son mezclas asfálticas utilizadas como “carpeta de rodadura” que se caracterizan por tener un elevado porcentaje de huecos (entre 18 y 25%) interconectados entre sí que permiten el paso del agua superficial a través de ella y su rápida evacuación hacia las zonas laterales fuera de la calzada. (Fig.2.5)

Figura 2.5 Mezcla drenante



Fuente: (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.7.1 Proposición de especificación para diseñar mezclas drenantes

El contenido óptimo de material bituminoso en la mezcla se deberá elegir de manera que se cumplan los siguientes criterios:

- ✓ Los vacíos con aire de la mezcla compactada, medidos como se indica en la norma de ensayo INV. E-736, no deberán ser inferiores a veinte por ciento (20%), ni mayores de veinticinco por ciento (25 %).
- ✓ Para asegurar que los vacíos con aire están debidamente interconectados, se realizará una prueba de permeabilidad. La capacidad de drenaje se mide colocando cien mililitros (100 ml) de agua en un molde conteniendo la probeta pre humedecida. El tiempo que tarde el agua en atravesar la muestra no deberá exceder de quince segundos (15 s).
- ✓ Las pérdidas por desgaste a veinticinco grados Celsius (25°C), determinadas de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma INV. E-760, no deberán ser superiores a veinticinco por ciento (25 %).
- ✓ La dosificación del material bituminoso no podrá ser inferior a cuatro y medio por ciento (4.5%), respecto del peso seco de los agregados, incluido la llenante mineral.
- ✓ Se deberá comprobar, además, la adhesividad entre el agregado y el ligante, caracterizando la mezcla en presencia de agua. Al efecto, la pérdida por abrasión en el ensayo Cántabro, según la norma de ensayo INV. E-760, tras ser sometidas las probetas a un proceso de inmersión en agua durante veinticuatro horas (24 h) a sesenta grados Celsius (60°C), no podrá exceder de cuarenta por ciento (40 %). Si se supera este valor, se deberá mejorar la adhesividad mediante un aditivo mejorador de adherencia apropiado. (Instituto Nacional de Vías, 2022)

Tabla 2.6 Gradación mezcla asfáltica drenante

Mezcla asfáltica drenante						
Tamices	Tamaño	Especificaciones ASTM D3515		Especificaciones con tolerancia ASTM D3515		Tolerancia de Gradación ASTM D3515
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
1½"	37,50					
1"	25,4					

Mezcla asfáltica drenante (continuación)						
Tamices	Tamaño	Especificaciones ASTM D3515		Especificaciones con tolerancia ASTM D3515		Tolerancia de Gradación ASTM D3515
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
3/4"	19,0					
1/2"	12,5	100	100	100	100	
3/8"	9,50	70	90	70	97	± 7
1/4"	6,35	-	-	-	-	
Nº4	4,75	15	30	15	37	± 7
Nº8	2,36	10	22	10	28	± 6
N. º10	2,00	-	-	-	-	
Nº30	0,60	6	13	6	18	± 5
N. º40	0,43	-	-	-	-	
Nº50	0,30	-	-	-	-	± 5
Nº100	0,15	-	-	-	-	± 5
Nº200	0,075	3	6	3	10	± 4
BASE	-	-	-	-	-	

Fuente: Elaboración propia

2.8 Caracterización del agregado en mezclas asfálticas

Para esta metodología se define una fórmula de trabajo (granulometría), la cual está en función de dos componentes: tamaño máximo nominal del agregado y los parámetros de control (superior e inferior), estos parámetros son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. Se deben realizar ensayos de laboratorio para determinar las características físicas de los agregados pétreos, con el fin de cumplir con las especificaciones en cuanto a resistencia, durabilidad, limpieza, forma, adherencia, entre otros; todo lo anterior, para obtener un óptimo desempeño mecánico de la mezcla asfáltica. (Acosta, 2017)

La caracterización de los materiales empleados para el diseño de mezclas asfálticas, en especial agregados, son fundamentales para garantizar estructuras duraderas. En la actualidad se ha venido implementando técnicas innovadoras que utilizan metodologías no destructivas, las cuales proveen información precisa sobre la estructura interna de los materiales al igual que sus características geométricas, su tamaño, distribución y contenido de vacíos en los agregados; también permiten estudiar la correlación de estas variables y su susceptibilidad al deterioro con componentes adicionales que se pueden

presentar como presencia de humedad, permeabilidad y capilaridad de las mezclas asfálticas. (Acosta, 2017)

2.8.1 Tamaño y estructura Granulométrica

La “estructura granulométrica” o simplemente “granulometría” se define como la distribución de tamaños del agregado que se empleará para “formar” una mezcla asfáltica. Es la característica más importante de los agregados ya que afecta la estabilidad y la trabajabilidad de las mezclas, y constituye, por lo tanto, uno de los requisitos básicos de las especificaciones.

2.8.2 Resistencia

Los agregados deben ser lo suficientemente estables ante los efectos impuestos por el manipuleo durante su paso a través de la planta de asfalto –que producen choques entre granos y de granos con componentes metálicos de la planta–, y procesos de compactación en las etapas de construcción, y ante los esfuerzos impuestos por las cargas en el período de acción bajo el tráfico.

Estos efectos y esfuerzos tienden a triturar y degradar las partículas, y la habilidad de un material para mantener su granulometría original ante ellos, se define como su resistencia.

2.8.3 Textura superficial

Se considera que la textura superficial (rugosidad) de los agregados es el principal contribuyente en la resistencia de las mezclas asfálticas a su deformación, llamada estabilidad, debido a la fricción que se desarrolla entre las diversas partículas como consecuencia del grado de textura que presentan los granos.

La textura es más importante que la angularidad del agregado en la estabilidad de una mezcla, lo cual se atribuye a que, entre las partículas, más que "puntos de contacto" existen "zonas de contacto", y por ello, mientras más rugosa es su superficie más difícil es el desplazamiento de una sobre otra. Adicionalmente, una superficie pulida presenta poca habilidad para mantener la película de asfalto adherida al agregado.

2.8.4 Porosidad

La porosidad, en mezclas asfálticas, se define como la propiedad de absorción de asfalto que tienen los agregados.

Es conveniente que estos agregados sean algo porosos, para que el asfalto "penetre" dentro de él y se adhiera mecánicamente a cada partícula, lo cual ayuda a evitar el desplazamiento

de la película de asfalto que se forma entre las diversas partículas de agregado ante el efecto de las cargas, y a la pérdida de ella ante la presencia y efecto del agua. (Acosta, 2017)

Se considera ideal un agregado que presente una absorción de agua entre un 0,5% y un 1,0%, cuando se realicen sobre él los ensayos de absorción normalizados como AASHTO T-84 y AASHTO T-85, tanto para los agregados gruesos como los finos.

2.8.5 Adherencia

La adherencia es la propiedad de un agregado para mantener sobre él la película de asfalto añadida. Depende no sólo del agregado, de su textura y composición química, sino en parte muy importante, del asfalto en sí. Para que una mezcla sea durable, debe existir una buena adherencia entre el agregado y el asfalto, para que se evite la separación de la película de asfalto en presencia de agua. (Ordoñez, 2001)

2.8.6 Gravedad Específica

La Gravedad Específica (G_s) se define como la relación entre el peso de un volumen de una cantidad determinada de agregados y el peso de un volumen igual de agua.

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

- ✓ Gravedad Específica Bulk (o masiva) = G_{sb}
- ✓ Gravedad Específica Aparente = G_{sa}
- ✓ Gravedad Específica Efectiva = G_{se}

2.8.7 Ensayo de abrasión por medio de la máquina de los ángeles

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5 mm (1 ½”) y agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (¾”), por medio de la máquina de los Ángeles. (Ordoñez, 2001)

2.8.8 Porcentaje de caras fracturadas en los agregados

Las especificaciones técnicas consideran el porcentaje de agregado grueso con caras fracturadas con el propósito de maximizar la resistencia al esfuerzo cortante con el incremento de la fricción entre las partículas. Otro propósito es dar estabilidad a los agregados empleados para carpeta o afirmado; y dar fricción y textura a agregados empleados en pavimentación.

La forma de la partícula de los agregados puede afectar la trabajabilidad durante su colocación; así como la cantidad de fuerza necesaria para compactarla a la densidad requerida y la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida de servicio.

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que se entrelazan al ser compactadas. El mejor entrelazamiento se da, generalmente, con partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, producidas, casi siempre por trituración

Este método permite determinar el porcentaje, en peso, de una muestra de agregado grueso con una, dos o más caras fracturadas

2.8.9 Equivalentes de arenas y agregados finos

Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm). El término “Equivalente de Arena” transmite el concepto que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezcla de partículas gruesas, arenas y generalmente finos.

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución en una probeta plástica graduada que luego de ser agitada separa el recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un período de tiempo, se pueden leer las alturas de arcilla y arena en la probeta. El equivalente de arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje. (Ordoñez, 2001)

Este método proporciona una manera rápida de campo para determinar cambios en la calidad de agregados durante la producción o colocación.

2.8.10 Índice de aplanamiento y alargamiento de agregados

Las partículas planas y alargadas son definidas respectivamente, como aquellas partículas cuya dimensión última es menor que 0.6 veces su dimensión promedio y aquellas que son mayores 1.8 veces la dimensión promedio. Para el propósito de esta prueba, la dimensión promedio se define como el tamaño medio entre las dos aberturas 1” a $\frac{3}{4}$ ”, $\frac{3}{4}$ ” a $\frac{1}{2}$ ”, $\frac{1}{2}$ ” a $\frac{3}{8}$ ”, etc. entre las que los agregados son retenidos al ser tamizados.

Después de haber sido cribados por la malla de abertura cuadrada y de dos mallas respectivamente, las partículas planas y alargadas se separan usando como patrón los

aparatos que se muestran, las partículas planas pueden ser separadas rápidamente pasándolas por cribas con ranuras, pero en este caso, se necesita un tipo de criba para cada tamaño. El porcentaje por peso de las partículas planas y alargadas se le designa con el nombre de índice de aplanamiento e índice de alargamiento. (Ordoñez, 2001)

2.8.11 Gravedad específica y absorción del agregado

La gravedad específica del agregado es necesaria para determinar el contenido de vacíos de las mezclas asfálticas compactadas. Por definición, la *gravedad específica* de un agregado es la relación del peso por unidad de volumen de un material respecto del mismo volumen de agua a aproximadamente 23°C (73.4°F). (Ordoñez, 2001).

2.9 Introducción al procesamiento mediante tomografía axial

Como definición general de los que son las imágenes digitales, se menciona que el procesamiento de imágenes digitales se puede definir como métodos y procesos para destacar información de una imagen empleando como elemento primordial un computador.

El análisis de las rocas muestra ventajas sobre otras técnicas de caracterización, y para optimizar la calidad de los resultados se emplean herramientas automatizadas de análisis de imágenes, con las que se visualiza aspectos cualitativos y el posible desempeño de los materiales utilizados.

Zeleeuw y Papagiannakis implementaron un algoritmo para el procedimiento digital de imágenes (DIP): se utilizan imágenes de sección circular (núcleos) en donde se conoce su volumen; su invención es que toman las propiedades volumétricas como razonamiento principal para delimitar nivel de grises para límites entre aire y masa al igual que entre mastic y agregado. (Zeleeuw et al, 2010).

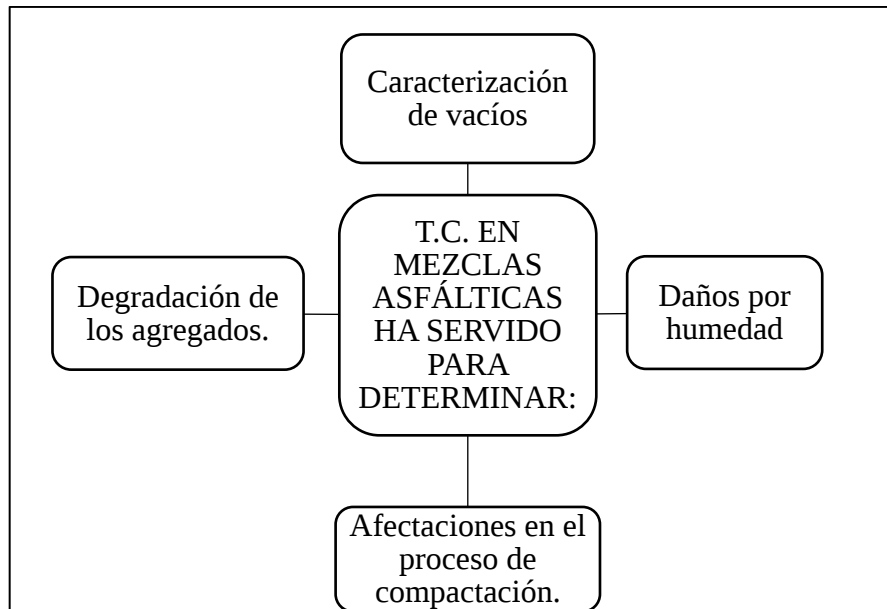
Implementaron el algoritmo con MATLABM y demostró producir imágenes reales de la microestructura de hormigones asfálticos. Varios autores utilizan el procesamiento digital de imágenes, para cuantificar la estructura interna y a partir de esta información poder definir parámetros como la segregación de la mezcla.

2.9.1 Tomografía computarizada

Se evalúan especímenes usando la tomografía y su posterior análisis empleando herramientas computacionales. Esta técnica ha generado una extensa aceptación en el estudio de suelos, textiles, materiales biológicos y mezclas asfálticas.

Las pruebas realizadas utilizando este sistema de rayos-X han generado resultados satisfactorios, permitiendo identificar las características enunciadas en la Figura 2.6.

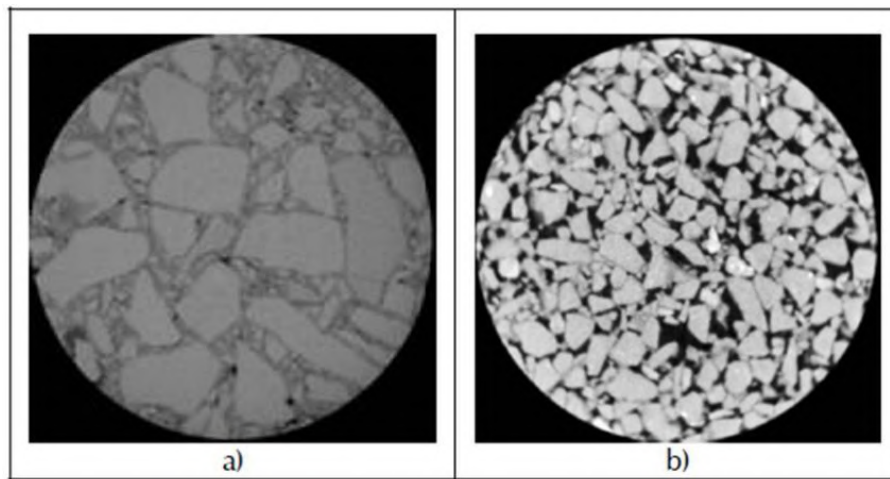
Figura 2.6 Tomografías computarizadas en mezclas asfálticas



Fuente: (Arias, 2021)

El sistema de TC que se utilizan en el análisis de mezcla asfáltica tiene similitud a los utilizados en el área de la medicina, la diferencia radica en el nivel de las TC y el tiempo de exposición de los especímenes es mayor, obteniendo así imágenes con mayor resolución aptas para el estudio, el uso de este sistema depende del tamaño del espécimen y su resolución, los utilizados en las mezclas asfálticas son los de alta y ultra resolución. Las imágenes que se obtienen a partir de TC permiten conocer los elementos que conforman la mezcla asfáltica, su distribución y proporción, el estudio de estas se hace mediante el procesamiento de algoritmos computacionales.

Figura 2.7 Ejemplos de una sección de mezcla



Fuente: Alex E. Edith A. Silvia S. (2008). Ejemplos de secciones de mezcla. Revista de ingeniería e investigación, volumen (28).

El estudio de las imágenes obtenidas a través de TC está relacionado directamente con la densidad de la mezcla, la imagen permite dar una visibilidad del espécimen que será analizado mediante una escala de colores siendo los más oscuros los de menores densidades y los más claros los de mayor densidad.

El uso de software en el estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas ha desarrollado diversas opiniones, debido a esto se realizan pruebas comparativas entre los resultados obtenidos en laboratorio Versus los obtenidos mediante la herramienta de análisis de imágenes.

2.9.1.1 Método de procesamiento y análisis de imágenes digitales

Las mezclas asfálticas porosas están compuestas de partículas discretas, por lo que la volumetría de la mezcla puede afectar directamente todas las propiedades de esta capa del pavimento.

La evaluación y el control de la volumetría de las capas de pavimento de mezcla porosa es cada vez más importante, debido al incremento masivo de su uso y la frecuente aparición de patologías tempranas, fundamentalmente de raveling.

Las propiedades mecánicas de una mezcla dependen fuertemente de la gradación de agregados que componen el esqueleto mineral de la muestra, y que dan lugar a una composición específica de AV. Es posible lograr una representación fiable de la distribución granulométrica, organización y orientación de las partículas mediante

imágenes tomadas sobre rebanadas de especímenes obtenidas mediante corte con sierra (de forma destructiva). Sin embargo, la obtención de dichas rebanadas implica una manipulación agresiva sobre la muestra, la cual modifica sustancialmente la organización de las partículas en la zona a analizar, como se puede observar en la siguiente figura, el paso de la sierra alisa la superficie de la muestra, cerrando muchos de los vacíos existentes. Es por esta razón por la que se emplea la tomografía computarizada ya que al no intervenir de manera directa la muestra, las imágenes a analizar corresponderán a la más fiel representación de lo que ocurre dentro del espécimen. (Trigos)

2.9.1.1.1 Análisis estadístico

Una vez concluidas las etapas de obtención de datos a partir de las tomografías computarizadas (TC), 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 utilizarán, 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.

- Estadística descriptiva

a) Media

Es la medida de posición más frecuentemente usada. Para calcular la media aritmética o promedio de un conjunto de observaciones se suman todos los valores y se divide por el número total de observaciones.

Si tenemos una muestra de n observaciones y denotadas por $X_1, X_2, \dots, X_n$, definimos la media muestral del siguiente modo:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

b) Moda

La moda es el dato que ocurre con mayor frecuencia en el conjunto. Es una medida de poca utilidad salvo para datos categóricos en los que suele interesar identificar la categoría con mayor cantidad de datos. En una muestra de datos numéricos, puede ocurrir que la moda sea un valor que se repite un cierto número de veces, pero que no es típico. Cuando se considera la distribución poblacional de una variable continua, decimos que esta es UNIMODAL si presenta un pico y BIMODAL si aparecen dos picos claros.

c) Varianza

Definimos la varianza de una muestra de observaciones $X_1, X_2, \dots, X_n$, cuya media es $\bar{X}$, como

$$S^2 = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n - 1} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

La varianza muestral puede pensarse como “promedio” de las distancias a la media al cuadrado.

d) Desviación estándar

Definimos la desviación estándar muestral como la raíz cuadrada positiva de la varianza

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

e) Coeficiente de varianza

El coeficiente de variación toma valores entre 0 y 1. Si el coeficiente es próximo al 0, significa que existe poca variabilidad en los datos y es una muestra muy compacta. En cambio, si tienden a 1 es una muestra muy dispersa y la media pierde confiabilidad.

$$CV = \frac{S_x}{\bar{x}} * 100$$

2.9.1.1.2 Evaluación de contacto agregado-agregado

Es la cuantificación de del número de contactos entre agregados esto dependerá mucho del tipo de mezcla de asfaltos y la cantidad de agregado grueso que contenga cada imagen digital obtenida de cada probeta dosificada con un contenido optimo.

2.9.1.1.3 Evaluación de los vacíos en las mezclas asfálticas

El objetivo general de este capítulo es la evaluación de técnicas basadas en el análisis de imagen para cuantificar el contenido de vacíos de cuatro mezclas asfálticas y reproducir su granulometría.

El análisis sobre el contenido de vacíos de la muestra se hizo en sentido horizontal(axial), con cortes paralelos a la base, con el fin de verificar el comportamiento de los vacíos en relación a la compactación dentro de la muestra.

2.9.1.1.4 Evaluación de la segregación en las mezclas asfálticas

La segregación en una mezcla asfáltica en caliente se puede definir como la falta de homogenización de sus constituyentes, presentando variaciones respecto a la fórmula

original de trabajo y su contenido de asfalto, lo que genera problemas en la estabilidad y textura del pavimento entregado, disminuyendo la comodidad del usuario y la vida de servicio de la estructura.

Existen dos tipos de segregación principalmente: la segregación granulométrica y la segregación por temperatura.

✓ **Segregación Granulométrica**

Es evidente que el tipo de segregación más perjudicial y corriente es la segregación granulométrica en la mezcla, la cual provoca una concentración de materiales gruesos en unas áreas del pavimento, mientras que las demás contienen una concentración de materiales más finos.

✓ **Segregación térmica**

La segregación térmica, se podría definir como la falta de homogeneidad de la temperatura de la mezcla durante la construcción del pavimento. Lo que produce el fallo prematuro de la carpeta.

El ideal de una mezcla, es que cada fracción sea suficientemente homogénea sin peligro de segregación

2.9.2 Metodología para la caracterización de M.A. tomografías

Si bien, la metodología se desarrolló con imágenes disponibles de concretos asfálticos preparados mediante el método de diseño Marshall, bajo condiciones controladas en laboratorio, su uso puede extenderse para otro tipo de evaluaciones tanto en procesos de producción de mezclas, como durante construcción u operación de vías. (Dueñas)

2.9.3 Aplicación del análisis de imagen a las mezclas asfálticas

El proceso metodológico con la aplicación de las herramientas del Software Syngo.Via View & Go, garantiza su éxito al acoger uno a uno y de manera sucesiva las pautas de cuantificación de las mediciones realizadas. Consecuente con lo anterior, el interés inicial se centra en la identificación y diferenciación de agregados sobre las imágenes. Después de varias observaciones, los pasos se volvieron sistemáticos, facilitando entre otras cosas, la detección de los agregados útiles para el proceso y eliminando aquellos que hagan perder tiempo por su falta de representatividad en las medidas. (Dueñas)

Se utilizó dos programas relacionados al Syngo Via, un demo de MicroDicom y Radiant Dicom Viewer. Los cuales facilitan las mediciones de los resultados que se quieren obtener en el presente documento.

2.9.3.1 Programa MicroDicom

La interfaz de usuario de MicroDICOM Viewer es muy sencilla, y apta para todo tipo de usuarios. Estas son algunas de sus características: abre, crea y guarda imágenes médicas en formato DICOM, permite el uso del zoom para analizar las imágenes al detalle y tiene un editor de imágenes básico para redimensionar, rotar e invertir imágenes.

2.9.3.2 Programa Radiant DICOM Viewer

RadiAnt DICOM Viewer le brinda las herramientas básicas para la manipulación y medida de las imágenes:

- Configuración predeterminada de ventana para Tomografías Computadas.
- Posibilidad de rotar (90, 180 grados) o girar las imágenes (horizontal y vertical).
- Longitud de segmento.
- Herramienta de lápiz para dibujar libremente (medir sus áreas).

2.9.3.3 Errores observados en las briquetas de mezclas asfálticas

En este numeral se presentan algunos de los inconvenientes reportados por Beltrán et. al (2006), relacionados con la preparación de las muestras para análisis y toma de imágenes, que dificultaron la realización de mediciones en cuanto a porosidad, estos pueden ser defecto de aplicación, arañazos en la resina, daños a la imagen y saturación en la elaboración del bloque. (Dueñas)

2.9.4 Análisis integral de la información obtenida en todas las imágenes

La evaluación de la mezcla asfáltica instalada en una vía del territorio nacional permitirá obtener resultados veraces del comportamiento de una mezcla puesta en servicio con un nivel de tránsito catalogados por la norma INVIAS 2014. Así esto, y teniendo en cuenta los cambios que puede presentar un pavimento flexible abierto al tráfico, se identificara mediante el análisis de imágenes vs ensayos de laboratorio la composición y comportamiento de la estructura de los asfaltos. (Dueñas)

También se ha observado que el proceso de raveling en estos materiales está fuertemente afectado por la orientación de los agregados en la muestra. Dado que el proceso de raveling es la pérdida de agregados debido a la concentración de esfuerzos tangenciales

sobre unidades de agregados individuales, dicho evento se hace más crítico cuando la fuerza tangencial se aplica sobre agregados con un mayor ángulo de inclinación sobre la horizontal, fundamentalmente sobre partículas aplanadas. Cabe anotar que tal fenómeno también depende que la cantidad y calidad de los puntos de contacto que tenga la partícula con las partículas vecinas

2.9.5 Elaboración o valoración de imágenes de briquetas de M.A.

Se debe validar las imágenes, revisar los constituyentes de la mezcla y sus orígenes, corroborar el software. (Dueñas)

El procedimiento realizado con la tomografía computarizada, permite ver que la compactación en laboratorio es mucho más efectiva en términos de reducción de vacíos con aire, logrando una mayor densidad. Lo que ocurre al compactar en la obra es que la reducción de la temperatura de la mezcla en un período de tiempo tan corto, no permite que el mastic haga un mejor trabajo reacomodándose en los intersticios dejados por el material pétreo de mayor tamaño. (Senior & Graciano, 2015)

2.9.6 Criterios de medición para la caracterización microscópica.

Se debe diseñar la mezcla asfáltica, se debe conocer los agregados esenciales para las mezclas asfálticas estudiadas y se proceder a la caracterización granulométrica de los agregados y de las mezclas asfálticas. (Dueñas)

Un factor que es de vital importancia para garantizar la densidad de la mezcla, es la temperatura a la cual se realiza la compactación. (Senior & Graciano, 2015)

CAPÍTULO III
APLICACIÓN PRÁCTICA
SOBRE LA EVALUACIÓN DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS CON
TOMOGRAFÍA
COMPUTARIZADA

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA SOBRE LA EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA.

3.1 Ubicación

La ubicación del agregado fino y grueso se encuentra en la provincia de Méndez, comunidad de Tomatitas. En la chancadora Ramírez.

Tiene los siguientes limites:

- ✓ Al norte limita con la comunidad de Rancho Sud
- ✓ Al sur limita con Obrajes
- ✓ Al este con San Mateo
- ✓ Al oeste con Erquiz Norte

Figura 3.1 Ubicación chancadora Ramírez



Fuente: Elaboración propia

La ubicación para la obtención del cemento asfáltico de penetración 85/100 se realizó de la Honorable Alcaldía Municipal de Tarija ubicada al lado del ex zoológico de Tarija, frente al Barrio El Carmen.

Figura 3.2 Ubicación Alcaldía de Tarija



Fuente: Elaboración propia

3.2 Caracterización de agregados

Para la caracterización del agregado fino, grueso y filler se deben realizar varios estudios que determinen la calidad de estos en la utilización para la elaboración de las mezclas asfálticas estudiadas.

El tipo de agregado grueso debe ser el que se obtiene de trituración, el agregado fino debe ser también resultado de trituración y el filler debe ser natural se le considerara como el material que pasa el tamiz N.º 200.

3.2.1 Ensayo de granulometría

Este ensayo se realizará con la finalidad de obtener la curva granulométrica de cada fracción que debe cumplir con la gradación que especifica el tipo de mezcla asfáltica estudiada estas deben cumplir con los tamices que se pida para calcular el cemento asfáltico mínimo el cual será el punto de partida para el ensayo de Marshall.

Los tamaños típicos utilizados en las franjas de gradación de mezclas asfálticas para un agregado de tamaño máximo nominal de 1" para la grava, 3/8" para gravilla y para la arena N.º 4, son: 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", N.º 4, N.º 8, N.º 10, N.º 30, N.º 40, N.º 50, N.º 100, N.º 200.

La gradación se describe como densa, abierta, fina y porosa o drenante y es considerada la primera consideración en un diseño de mezclas asfálticas.

Para este ensayo se trabajó con tres tipos de gravas, 4 tipos de gravillas, 4 tipos de arenas. En mezclas asfálticas densas y finas el agregado grueso y el fino cumplían con la combinación de agregados quedando dentro de la franja de tolerancia.

En mezclas asfálticas finas el primer agregado no cumplía por ende se seleccionó otro agregado grueso y fino.

En mezclas asfálticas drenantes solo se trabajó con gravilla y agregado fino. Los resultados deben ser firmados por el encargado de laboratorio ver ANEXO I.

Equipo

- ✓ Juego de tamices
- ✓ Balanza
- ✓ Horno
- ✓ Herramientas y accesorios: espátula, fuentes para los agregados, otros.

Tamaño de la muestra

- ✓ Se extrajo y se preparó la muestra a utilizar en el ensayo, con tres tipos de agregados obtenidos por trituración estos son la grava, gravilla y arena.
- ✓ Respectivamente se realizó el secado de la muestra con un extendido en bandejas una fuerte cantidad de material fino y grueso.
- ✓ Para el tamaño máximo nominal de la grava que es de 25mm (1”) se utilizó una cantidad superior a los 10kg como lo indica la ASTM E 40 ASSHTO T27-99.
- ✓ Para el tamaño máximo nominal de la gravilla que es de 9,5mm (3/8”) se utilizó una cantidad superior a los 4kg como lo indica la ASTM E 40 ASSHTO T27-99.
- ✓ En el caso del material fino para un tamaño máximo nominal de 4,75mm (N.º 4) se utilizó una cantidad superior a los 500 gramos esto debido a que este material se utilizara en la combinación de agregados.

Procedimiento

- ✓ Se selecciono un juego de tamices a partir del tamiz 1½” hasta el tamiz N. º4 y para las gravillas desde el tamiz ½” hasta el tamiz N. º10 para tener una mayor precisión cuando se esté tamizando los agregados.

- ✓ Para el agregado fino se seleccionó una serie de tamices desde el tamiz ¼” hasta el tamiz N. °200 donde esta serie de tamices deben estar limpios y secos, verificando que estos no presenten ningún daño para que al tamizar no exista errores.
- ✓ Para el tamizado se realizó de manera manual por lo tanto a la hora de tamizar en cada tamiz se realizó hasta que ningún agregado pasara al siguiente tamiz esto se realizó con toda la muestra requerida para cada agregado grueso y fino.
- ✓ El material retenido en cada tamiz se colocó en diferentes fuentes para distinguirlos a la hora de pesarlos.
- ✓ Al final se pesó el material total retenido en cada tamiz en la balanza con una aproximación de 1gr.

Figura 3.3 Juego de tamices para realizar el análisis granulométrico



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4 Pesado de los materiales retenidos en cada malla



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

- ✓ Se registra la masa total (100%) de las cantidades retenidas en todos los tamices y lo que pasa el tamiz N.º 200 (Filler).
- ✓ se calcula el porcentaje parcial retenido en cada tamiz.
- ✓ Y finalmente se expresa la granulometría como porcentaje acumulado que pasa.

Resultados

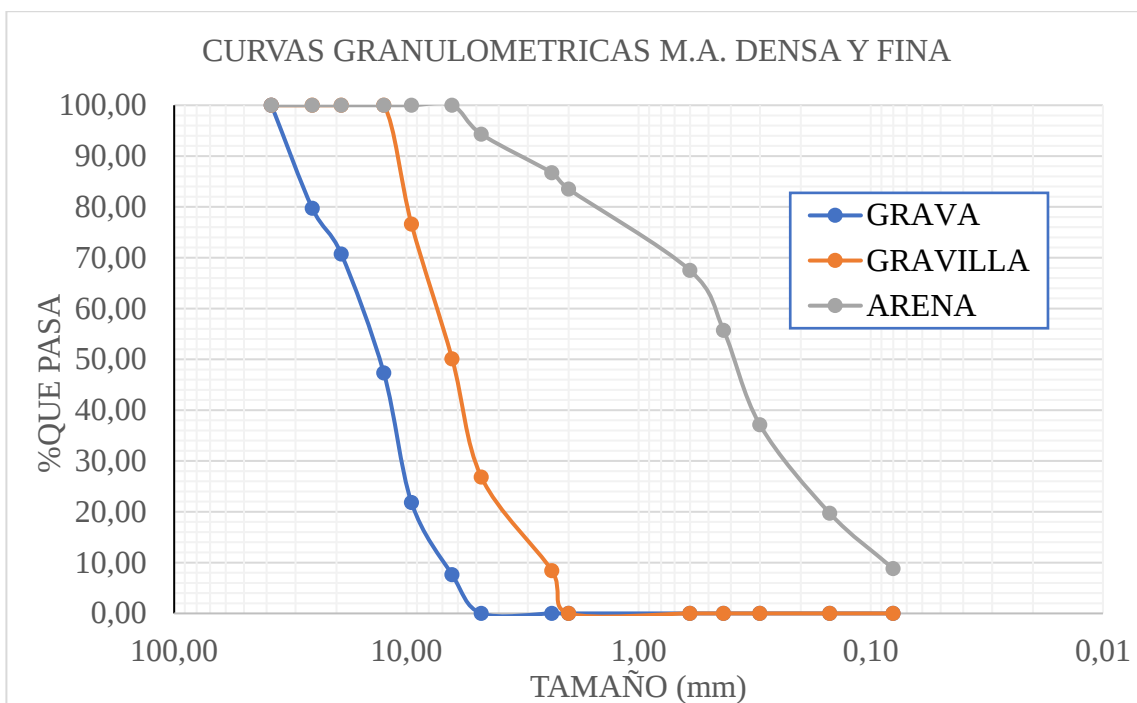
- ✓ **Curva granulométrica de los agregados gruesos y finos para mezclas asfálticas densas y finas.**

Tabla 3.1 Granulometría de materiales M.A. Densa y M.A. Fina

Tamices	Tamaño (mm)	GRAVA % Que pasa del total	GRAVILLA % Que pasa del total	ARENA % Que pasa del total	FILLER % Que pasa tamiz # 200
1½"	38,10	100,0	100,0	100,0	
1"	25,40	79,7	100,0	100,0	
¾"	19,05	70,7	100,0	100,0	
½"	12,50	47,3	100,0	100,0	
3/8"	9,50	21,8	76,6	100,0	
¼"	6,35	7,6	50,1	100,0	
N.º4	4,75	0,0	26,8	94,3	
N.º8	2,36	0,0	8,4	86,7	
N.º 10	2,00	0,0	0,0	83,5	
Nº30	0,60	0,0	0,0	67,5	
N.º 40	0,43	0,0	0,0	55,7	
Nº50	0,30	0,0	0,0	37,1	
Nº100	0,15	0,0	0,0	19,7	
Nº200	0,08	0,0	0,0	8,8	100
BASE	0	0,0	0	0,0	100

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5 Curva granulométrica agregados M.A. Densa y Fina



Fuente: Elaboración propia

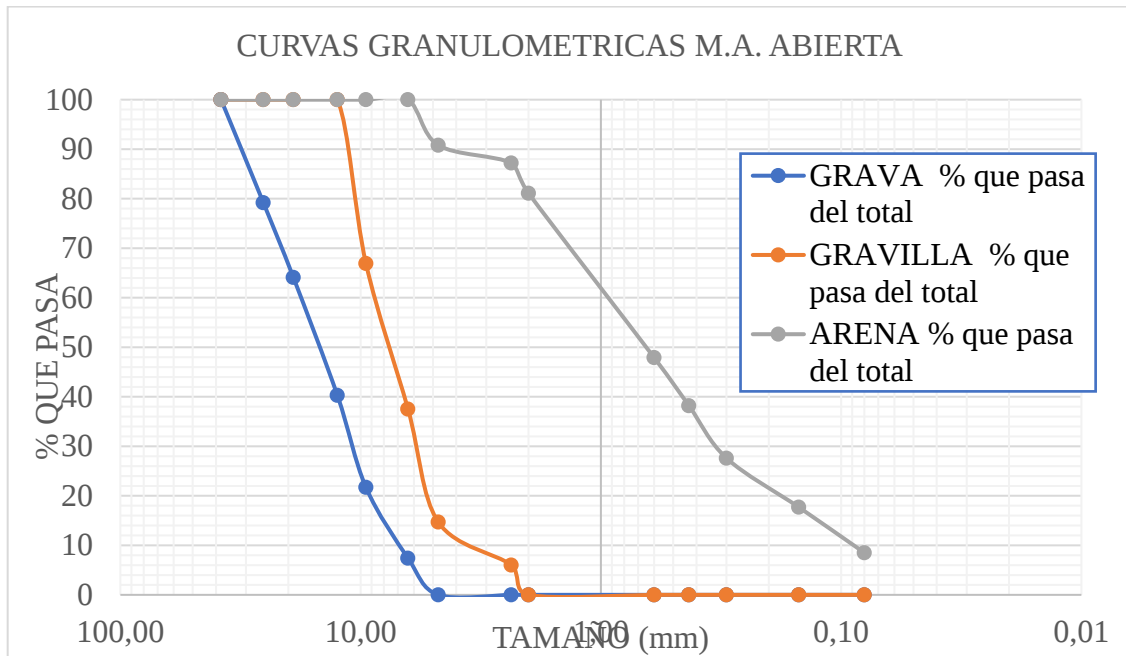
- ✓ **Curva granulométrica de los agregados gruesos y finos para mezclas asfálticas abiertas.**

Tabla 3.2 Granulometría de la grava para M.A. Abiertas

Tamices	Tamaño (mm)	GRAVA % que pasa del total	GRAVILLA % que pasa del total	ARENA % que pasa del total	FILLER % Que pasa tamiz # 200
1½"	38,10	100	100	100	
1"	25,40	79,2	100	100	
¾"	19,05	64,1	100	100	
½"	12,50	40,3	100	100	
⅜"	9,50	21,7	66,9	100	
¼"	6,35	7,4	37,5	100	
N.º4	4,75	0	14,7	90,8	
N.º8	2,36	0	6	87,2	
N.º 10	2,00	0	0	81,1	
Nº30	0,60	0	0	47,9	
N.º 40	0,43	0	0	38,2	
Nº50	0,30	0	0	27,6	
Nº100	0,15	0	0	17,7	
Nº200	0,08	0	0	8,5	100,00
BASE	0,00	0	0	0	100,00

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6 Curva granulométrica agregados M.A. abiertas



Fuente: Elaboración propia

- ✓ **Curva granulométrica de los agregados gruesos y finos para mezclas asfálticas drenantes o porosas.**

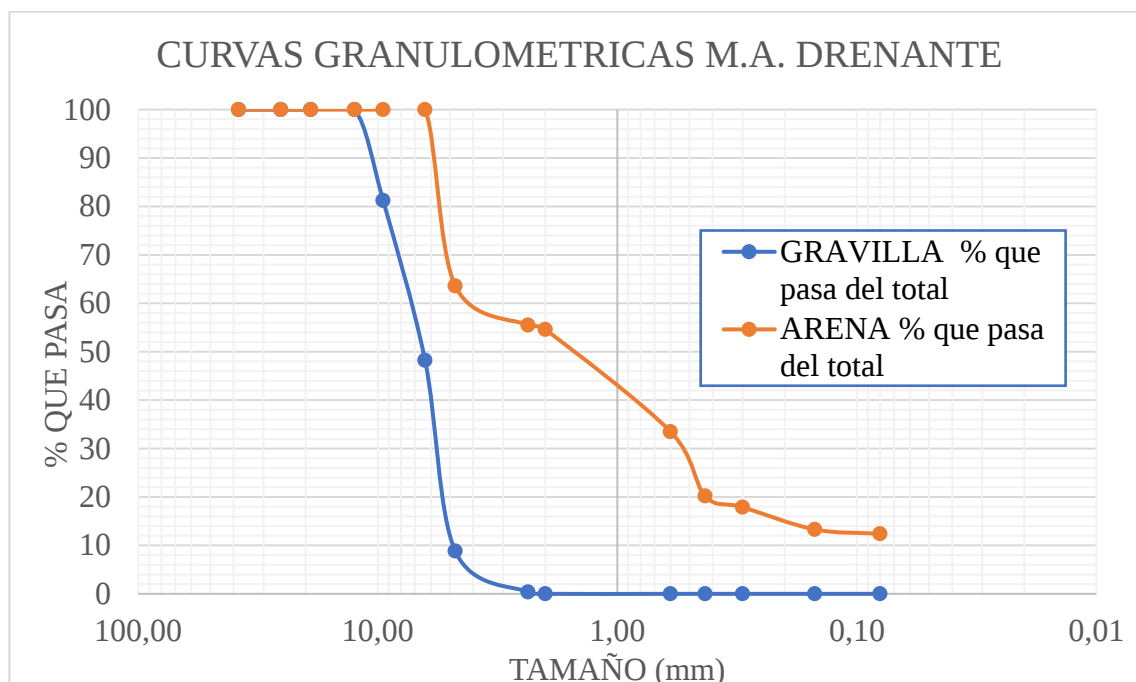
Tabla 3.3 Granulometría agregados para M.A. Drenante

Tamices	Tamaño (mm)	GRAVILLA % que pasa del total	ARENA % que pasa del total	FILLER % Que pasa tamiz # 200
1½"	38,10	100	100	
1"	25,40	100	100	
¾"	19,05	100	100	
½"	12,50	100	100	
⅜"	9,50	81,23	100	
¼"	6,35	48,22	100	
N.º4	4,75	8,83	63,6	
N.º8	2,36	0,37	55,5	
N.º 10	2,00	0	54,6	
Nº30	0,60	0	33,5	
N.º 40	0,43	0	20,2	

N°50	0,30	0	17,9	
N°100	0,15	0	13,3	
N°200	0,08	0	12,4	100,00
BASE	0,00	0	0	100,00

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7 Curva granulométrica agregados para M.A. Drenante



Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Ensayo de abrasión por medio de la máquina de los ángeles

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación. En este caso estos agregados serán utilizados en la elaboración de briquetas.

Los agregados utilizados en la capa base y carpeta asfáltica deben ser más resistentes que los agregados usados en capas inferiores debido a que reciben mayor esfuerzo y desgaste por las cargas que transmiten el tránsito. Al finalizar estos ensayos deberán ser corregidas y firmadas las planillas por el docente encargado ver ANEXO II.

Objetivo del ensayo

Este ensayo describirá dos tipos de procedimientos que se deberán realizar para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados gruesos menores a 37,5mm (1½”) y de tamaños

mayores a $\frac{3}{8}$ " los mismos que son estudiados para la elaboración de mezclas asfálticas densas, finas y abiertas y para agregados menores a $\frac{1}{2}$ " pero de tamaños mayores a 4,75mm (N° 4).

Equipo de laboratorio

- ✓ Máquina de desgaste de Los Ángeles
- ✓ Tamices de los tamaños 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", N.º 4, N.º 8, N.º 12
- ✓ Esferas de acero
- ✓ Horno
- ✓ Balanza
- ✓ Herramientas y accesorios (fuentes, cucharas, espátula, cepillo, trapo, otros)

Material y tipo de carga abrasiva según el diámetro del agregado

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

La gradación que se usa es representativa de la muestra original, el peso de agregado y número de esferas se determinara según el método a emplear según la siguiente tabla.

Tabla 3.4 Requerimiento según el tamaño de material que se tenga

Tabla ASTM C-131 de requerimiento según el tamaño de material que se tenga					
Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
Pasa	Retenido				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
Peso total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Número de esferas		12	11	8	6
N° de Revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación		15	15	15	15

Fuente: Elaboración propia

Procedimiento

- ✓ Los agregados fueron secados al horno y tamizados en las cantidades del método A para las gravas y método C para las gravillas.
- ✓ Una vez pesados estos se procedieron a mezclar en una fuente.
- ✓ En el equipo de desgaste de la Máquina de Los Ángeles se colocó el agregado con la carga abrasiva para el método A en gravas, y método C en gravillas, se procedió a cerrar la abertura del cilindro con su tapa, la cual impedirá que el polvo salga por medio de la tapa.
- ✓ Cuando finalizo el tiempo de rotación, se procedió a sacar el material y tamizar en el N.º 12, el material que se retuvo en el N.º 12 se procede a lavar y secar en el horno durante 24 hrs para luego proceder a pesar en su estado seco.

Figura 3.8 Cilindro metálico para realizar la prueba de desgaste de “Los Ángeles”



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.9 Pesaje de los materiales retenidos según el método de abrasión



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10 Introducción de la muestra en la máquina de “Los Ángeles”



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11 Tamización del material por malla N.º12



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.12 Lavado del material retenido en malla N.º 12



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

- ✓ **Para los agregados de mezclas asfálticas finas y densas**

Tabla 3.5 Desgaste para agregados M.A. Finas y Densas

	GRAVA	GRAVILLA
Gradación	A	C
N.º de Esferas	12	8
N.º de Revoluciones	500	500
% de Desgaste < 40%	30,63	20,61

Fuente: Elaboración propia

- ✓ **Para los agregados de mezclas asfálticas abiertas**

Tabla 3.6 Desgaste de los ángeles para agregados M.A. Abiertas

	GRAVA	GRAVILLA
Gradación	A	C
N.º de Esferas	12	8
N.º de Revoluciones	500	500
% de Desgaste < 40%	28,75	27,25

Fuente: Elaboración propia

- ✓ **Para los agregados de mezclas asfálticas drenantes o porosas**

Tabla 3.7 Desgaste de los ángeles para gravilla M.A. Drenante

	GRAVILLA
Gradación	C
N.º de Esferas	8
N.º de Revoluciones	500
% de Desgaste < 40%	23,28

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Equivalente de arenas

Este ensayo nos da a conocer la calidad del material, mientras mayor sea el equivalente de arena (SE) mejor será la calidad del material. Al finalizar estos ensayos deberán ser corregidas y firmadas las planillas por el docente encargado ver ANEXO III.

Equipo de laboratorio

- ✓ 3 probetas graduadas
- ✓ 3 tapones de goma
- ✓ Pisón de metal
- ✓ Recipiente metálico
- ✓ Cronometro
- ✓ Embudo
- ✓ Tamiz N.º 4
- ✓ Reactivo

Preparación de la muestra

- ✓ Se disolvió cloruro de calcio anhidro en agua destilada. Se dejó enfriar a temperatura ambiente.
- ✓ Se separó aproximadamente unos 1000 gramos de material fino que pasa el tamiz N.º 4.

Procedimiento

- ✓ Por el embudo se vertió la solución de trabajo en las tres probetas debido a que este resultado al final se promediara para un mejor resultado.
- ✓ Luego de verter la solución se debe verter en la probeta el suelo preparado hasta la línea que describe cada una que es aproximadamente 85 cm³.

- ✓ Se colocó el tapón de goma a cada probeta y se procedió a agitarlo hasta que las burbujas de aire se desalojaran y la muestra se humedezca totalmente. Esta se dejó reposar por 24 horas para mejores resultados.
- ✓ Una vez estabilizada la muestra y donde se puede verificar la diferencia entre arcillas y arenas se procede a medir el nivel superior de la suspensión de arcilla denominado H2.
- ✓ Se baja el pistón hasta que su pie repose sobre las arenas y se procede a medir la altura H1 que es la distancia entre la cara inferior de la cabeza del pistón y el fondo de la probeta.
- ✓ Una vez tomados los datos se procedió a lavar los instrumentos para realizar dos veces más este ensayo debido a que se está trabajando con tres tipos de arenas.

Figura 3.13 Probetas de ensayo por cada arena utilizado en diferente M.A.



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

Se calculó el equivalente de arena con la siguiente ecuación:

$$E.A. = \frac{H1}{H2} * 100 = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} * 100$$

Donde:

E. A. = Equivalente de arena (%)

H1= Lectura de arena (cm)

H2= Lectura de arcilla (cm)

El valor de E. A. de arena calculado será registrado como el número entero superior.

Donde según tabla para mezclas asfálticas el E. A. debe ser mayor a 50% en pavimentación.

Resultados

Tabla 3.8 Ensayo Equivalente de Arena en M.A.

	M.A. DENSAS y FINAS	M.A. ABIERTAS	M.A. DRENANTES	Norma
Equivalente de Arena (%) > 50%	96	91	86	> 50%

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Índice de aplanamiento y alargamiento de agregados

Para el propósito de este ensayo, la dimensión promedio se define como el tamaño medio entre dos aberturas de tamiz en la que los agregados son retenidos al ser tamizados.

Una vez tamizados por la malla de abertura cuadrada y de dos mallas, estos agregados pasaran por un calibrador de espesores y un calibrador de longitud. Al finalizar estos ensayos deberán ser corregidas y firmadas las planillas por el docente encargado ver ANEXO IV.

Equipo

- ✓ Calibrador de aplanamiento y alargamiento
- ✓ Tamices: 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", ¼"
- ✓ Bandejas
- ✓ Cuarteador
- ✓ Balanza
- ✓ Herramientas y accesorios

Preparación de la muestra

- ✓ Mediante cuarteo se obtuvo una muestra representativa de los distintos agregados que serán estudiados para la elaboración de mezclas asfálticas.
- ✓ Esta muestra se tamizará por las mallas indicadas y se determinó el peso retenido entre dos mallas consecutivas W_i .
- ✓ Una vez obtenido el peso entre dos mallas se procederá a pasa por el calibrador de espesores y por el calibrador de longitud.

Procedimiento

- ✓ Cada muestra separada entre los tamices se procedió a pasar por el calibrador de espesores en la ranura cuya abertura pertenezca a la fracción que ensaya.
- ✓ Se pesó la cantidad de partículas de cada fracción que pasaron por la ranura correspondiente P_i .
- ✓ Nuevamente las muestras vuelven a ser el mismo peso inicial con el que se trabajó en el calibrador de espesores, en este caso la abertura será la misma separación entre barras correspondiente a cada fracción que se ensaya.
- ✓ Cada agregado deberá pasar por su lado más largo y no por su lado corto por lo tanto el agregado que se retenga entre las dos barras será puesto en una fuente y será pesado R_i .

Figura 3.14 Calibrador de longitud y calibrador de espesores



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.15 Tamizado y pesado del material grueso



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

- Índice de aplanamiento

$$IAP_{fi}(\%) = \frac{P_i}{W_i} * 100$$

Donde:

IAP_{fi} = Índice de aplanamiento de fracción i, ensayada

P_i = Peso de partículas que pasan por la ranura correspondiente.

W_i = Peso inicial de esa fracción

- Índice de alargamiento

$$IAL_{fi}(\%) = \frac{R_i}{W_i} * 100$$

Donde:

IAL_{fi} = Índice de alargamiento de fracción i, ensayada

P_i = Peso de partículas retenidas entre las correspondientes barras.

W_i = Peso inicial de esa fracción

Para ambos índices se debe redondear los resultados al número entero más próximo.

Resultados

Tabla 3.9 Índice de aplanamiento y alargamiento de agregados en M.A.

Agregado	Índice Global de Alargamiento y Aplanamiento	M.A. Densa y Fina	M.A. Abierta	M.A. Drenante
Grava	I. G. APL. < 20%	17	17	-
	I. G. AL. < 20%	19	19	
Gravilla	I. G. APL. < 20%	19	18	19
	I. G. AL. < 20%	18	19	19

Fuente: Elaboración propia

3.2.5 Gravedad específica de agregados gruesos ASTM C-127

Este ensayo tuvo por finalidad calcular las gravedades específicas seca Bulk, gravedad específica seca aparente y la gravedad específica saturada superficialmente seca Bulk de los agregados como ser la grava y gravilla para los cuatro tipos de mezclas asfálticas estudiadas. Al finalizar estos ensayos deberán ser corregidas y firmadas las planillas por el docente encargado ver ANEXO V.

Equipo

- Balanza
- Cesto cilíndrico de tela metálica
- Fuentes
- Cuchara
- Trapos

Procedimiento del ensayo

- ✓ Se pesaron 15kg de muestra retenidos en la malla N.º 4 (4,75mm) para realizar 3 ensayos de 5kg cada uno para un agregado grueso para mayor efectividad en los resultados.
- ✓ La muestra se sumerge en bandejas por 24 horas.
- ✓ Los agregados se sacaron del agua se los seca las películas de agua que tienen por encima y se obtiene el peso en su condición superficialmente seca
- ✓ La muestra saturada superficialmente seca se la procede a colocar en la cesta de alambre y se determina el peso sumergido en agua.

- ✓ La muestra se la procede a colocar en una bandeja y se la seco en el horno durante 24 horas y se la vuelve a pesar en su estado seco.

Figura 3.16 Agregados gruesos sumergidos en agua durante 24 horas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.17 Obtención del peso en su condición superficialmente seca



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.18 Preparación del equipo para hallar el peso sumergido del agregado



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.19 Calibración de la balanza para el peso sumergido



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.20 Balanza calibrada para conocer el peso sumergido del agregado



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.21 Determinación del peso sumergido en agua del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.22 Secado en el horno del material grueso durante 24 horas



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

La gravedad específica se calcula según:

A= peso en el aire del agregado seco al horno (gr.)

B= peso en el aire del agregado saturado superficialmente seco (gr)

C= peso del agregado saturado superficialmente seco sumergido en agua (gr.)

Gravedad específica seca aparente,

$$Gsa = \frac{A}{(A - C)}$$

Gravedad específica seca Bulk,

$$Gsb = \frac{A}{(B - C)}$$

Gravedad específica saturada superficialmente seca Bulk,

$$Gsssb = \frac{B}{(B - C)}$$

Absorción

$$(\%) = \frac{(B - A)}{A} * 100$$

Baja absorción < 2%

Resultados

gr/cm³

✓ Para mezclas asfálticas finas y densas

Tabla 3.10 Peso específico de la grava en M.A. densas y finas

Determinación	Promedio
G. E. Seca (gr/cm ³)	2,57
G. E. Saturada Sup. Seca (gr/cm ³)	2,61
G. E. Seca aparente (gr/cm ³)	2,68
(%) porcentaje de absorción < 2%	1,68

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11 Peso específico de la gravilla en M.A. densas y finas

Determinación	Promedio
G. E. Seca (gr/cm ³)	2,56
G. E. Saturada Sup. Seca (gr/cm ³)	2,61
G. E. Seca aparente (gr/cm ³)	2,70
(%) porcentaje de absorción < 2%	1,95

Fuente: Elaboración propia

✓ Para mezclas asfálticas abiertas

Tabla 3.12 Peso específico de la grava en M.A. Abiertas

Determinación	Promedio
G. E. Seca (gr/cm ³)	2,58
G. E. Saturada Sup. Seca (gr/cm ³)	2,62
G. E. Seca aparente (gr/cm ³)	2,70
(%) porcentaje de absorción < 2%	1,75

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13 Peso específico de la gravilla en M.A. Abiertas

Determinación	Promedio
G. E. Seca (gr/cm ³)	2,57
G. E. Saturada Sup. Seca (gr/cm ³)	2,61
G. E. Seca aparente (gr/cm ³)	2,70
(%) porcentaje de absorción < 2%	1,90

Fuente: Elaboración propia

✓ **Para mezclas asfálticas drenantes o porosas**

Tabla 3.14 Peso específico de la gravilla en M.A. Drenantes

Determinación	Promedio
G. E. Seca (gr/cm ³)	2,57
G. E. Saturada Sup. Seca (gr/cm ³)	2,61
G. E. Seca aparente (gr/cm ³)	2,70
(%) porcentaje de absorción < 2%	1,90

Fuente: Elaboración propia

3.2.6 Gravedad específica de agregados finos ASTM -128

Este ensayo tuvo por finalidad calcular las gravedades específicas seca Bulk, gravedad específica seca aparente y la gravedad específica saturada superficialmente seca Bulk de la arena para los cuatro tipos de mezclas asfálticas. Al finalizar estos ensayos deberán ser corregidas y firmadas las planillas por el docente encargado ver ANEXO V.

Equipo

- ✓ Balanza
- ✓ Fuentes
- ✓ Cuchara
- ✓ Tres matraces de 500ml
- ✓ Pipeta
- ✓ Jarra

- ✓ Embudo
- ✓ Secadora

Procedimiento del ensayo

- ✓ Aproximadamente 2000 gramos de agregado fino se pesan para realizar este ensayo.
- ✓ Se sumergió toda la muestra por 24 horas en agua.
- ✓ Al día siguiente la muestra se extendió en una zona plana y se secara con la secadora.
Esta muestra se colocará en un cono metálico si la muestra rueda suavemente compactada es que alcanzo la condición saturada superficialmente seca.
- ✓ Se procede a colocar 500 gramos de la muestra en el matraz y luego se llena de agua y se procede a pesar.
- ✓ El agregado se saca del matraz, se seca en el horno por 24 horas y se procede a pesar cuando ya no presente ninguna humedad.

Figura 3.23 Agregados finos sumergidos en agua durante 24 horas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.24 Secado del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.25 Colocación de las arenas en el cono metálico



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.26 Medición de la temperatura y pesaje del material fino



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

La gravedad específica se calcula de la siguiente manera:

A= peso en el aire seco del agregado seco al horno (gr.)

B= peso del matraz con agua (gr.)

C= peso del matraz con el agregado más agua hasta la marca (gr.)

D= peso del material saturado superficialmente seco (gr.)

Gravedad específica seca aparente,

$$Gsa = \frac{A}{B + A - C}$$

Gravedad específica seca Bulk,

$$Gsb = \frac{A}{B + D - C}$$

Gravedad específica saturada superficialmente seca Bulk,

$$Gsssb = \frac{D}{B + D - C}$$

Absorción

$$(\%) = \frac{D - A}{A} * 100$$

- **Resultados**

Tabla 3.15 Peso específico de la arena en M.A. densas y finas

Determinación	Promedio
G. E. Seca (gr/cm ³)	2,60
G. E. Saturada Sup. Seca (gr/cm ³)	2,66
G. E. Seca aparente (gr/cm ³)	2,75
(%) porcentaje de absorción < 2%	1,96

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16 Peso específico de la arena en M.A. Abiertas

Determinación	Promedio
G. E. Seca (gr/cm ³)	2,58
G. E. Saturada Sup. Seca (gr/cm ³)	2,63
G. E. Seca aparente (gr/cm ³)	2,72
(%) porcentaje de absorción < 2%	1,96

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17 Peso específico de la arena M.A. Drenantes

Determinación	Promedio
G. E. Seca (gr/cm ³)	2,60
G. E. Saturada Sup. Seca (gr/cm ³)	2,65
G. E. Seca aparente (gr/cm ³)	2,74
(%) porcentaje de absorción < 2%	1,96

Fuente: Elaboración propia

3.3 Caracterización de las mezclas asfálticas

Para la caracterización del asfalto que se utilizara en las mezclas asfálticas se necesitarán verificar sus propiedades con los siguientes ensayos que al finalizar cada ensayo debe ser firmado por el encargado de laboratorio para verificar la veracidad de los resultados ver ANEXO VI.

3.3.1 Ensayo de penetración

Este es un método que se utilizó para medir la consistencia del cemento asfáltico. Para nuestro medio se trabaja con cementos asfálticos de penetraciones 85/100.

Equipo

- ✓ Equipo de penetración
- ✓ Aguja de penetración
- ✓ Baño de agua
- ✓ Vasos de precipitación
- ✓ Cronometro
- ✓ Herramientas y accesorios

Preparación de la muestra

- ✓ Se debe tomar una muestra representativa de la muestra total la cual se obtendrá mediante el calentado del cemento asfáltico este calentamiento no exceder los 30 minutos y la cual una vez calentada deberá ser distribuida en 3 vasos de precipitación con una capacidad de 50 ml cada vaso.
- ✓ Una vez que la muestra es colocada en los vasos estas deben ser enfriadas a temperatura ambiente aproximadamente 1 hora luego de este tiempo son sumergidos en un baño maría a 25°C durante 30min.

Condiciones de ensayo

Las condiciones de ensayo para la temperatura de 25°C es un tiempo de 5 segundos.

Procedimiento de ensayo

- ✓ Se debe de colocar la aguja de penetración limpia en la máquina de penetración
- ✓ Se baja la aguja de penetración hasta que tenga una distancia mínima entre la punta y la superficie de la muestra. Luego se procede a permitir que la aguja baje el periodo de tiempo especificado y finalmente se lee y anota la distancia que haya penetrado la aguja en la muestra.

- ✓ Se realizó un mínimo de tres penetraciones en la superficie de la muestra, las penetraciones deben estar distanciadas un mínimo de 10mm de la pared y uno respecto del otro.

Figura 3.27 Equipo de Penetración



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.28 Muestra de C.A. en 3 vasos de precipitación de 50 ml



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.29 Ajuste de la aguja para ensayar la penetración



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.30 Medición de las muestras de C.A. con el equipo de penetración



Fuente: Elaboración propia

Resultados

Tabla 3.18 Tabla de resultados de penetración del C.A.

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Penetración	0,1 mm.	86	87	88	87	85	100

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Ensayo de Viscosidad

Se determino empíricamente la resistencia al escurrimiento de asfaltos líquidos (su fluidez) mediante el aparato que recibe el nombre de viscosímetro Saybolt.

Equipo

- ✓ Viscosímetro Saybolt
- ✓ Cronometro
- ✓ Termómetro para la viscosidad
- ✓ Termómetro de baño
- ✓ Vasos de precipitación
- ✓ Tapón de caucho

Procedimiento

- ✓ Antes de iniciar se debe determinar que la temperatura del aceite y del asfalto estén a 135°C caso contrario no se podrá comenzar el ensayo.
- ✓ Una vez que ambos estén a la misma temperatura se procederá a quitar el tapón del Saybolt en un vaso de precipitación de 60ml, y se medirá el tiempo en que tarda en llenar los 60ml esto se realizara con 3 vasos de precipitación para promediar la viscosidad Saybolt.

Temperaturas óptimas:

85 ±10 seg. Mezcla (146 - 152)

140 ±15 seg. Compactación (134 – 138,5)

Figura 3.31 Viscosímetro Saybolt



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.32 Medición de la temperatura del aceite y el asfalto



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.33 Medición del tiempo para calcular la Viscosidad Saybolt



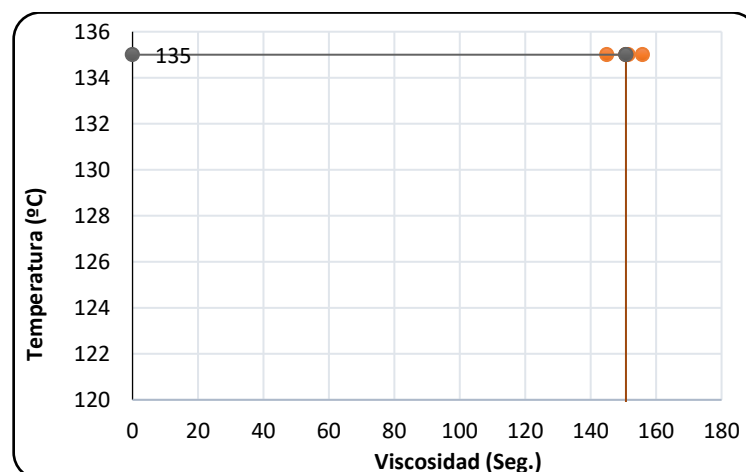
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.19 Tabla de resultados de viscosidad del C.A.

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Viscosidad C.	°C	151,52	155,88	144,95	150,8	140	155

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.34 Viscosidad del C.A.



Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Peso específico del asfalto

El peso específico de un asfalto es esencial en la determinación del % de vacíos en un pavimento flexible (Asphalt Institute. 1992).

Equipo

- ✓ Picnómetro de vidrio
- ✓ Vaso precipitado
- ✓ Baño de agua
- ✓ Termómetro
- ✓ Agua destilada
- ✓ Balanza
- ✓ Herramientas y accesorios

Procedimiento

- ✓ Se pesa el picnómetro limpio y seco
- ✓ Se llena el picnómetro con agua destilada a temperatura de 25°C por un periodo de 30min y se procede a pesarlo
- ✓ Se calienta la muestra hasta que la misma sea fluida y se vierte en el picnómetro hasta llenar las $\frac{3}{4}$ partes de su capacidad y se procede a dejarla enfriar durante 30min y se procede a pesarla.
- ✓ Se retira el vaso con la muestra pasado los 30 min y se le introduce el vaso que contenía el agua destilada a 25°C nuevamente se le coloca en el baño María por 30 min. Y al final se procede a pesar.

Figura 3.35 Muestras colocadas en el baño María para el ensayo de peso específico



Fuente: Elaboración propia

- ✓ Este procedimiento se realizará para 3 muestras de esta manera se promediará los resultados para una mayor precisión.

Resultados

Tabla 3.20 Tabla de resultado del peso específico del C.A.

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Peso Específico Promedio	grs./cm ³	1,006	1,019	1,003	1,010	1,00	1,05
Gravedad específica	-	1,009	1,022	1,006	1,013	1,00	1,05

Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Ensayo de ductilidad

Este ensayo sirvió para verificar la longitud máxima antes de romperse.

Figura 3.36 Ductilímetro



Fuente: Elaboración propia

Equipo

- ✓ Tres moldes
- ✓ Baño de agua
- ✓ Ductilímetro
- ✓ Termómetro
- ✓ Espátula
- ✓ Vaselina liquida
- ✓ Talco sin olor
- ✓ Plato

- ✓ Taras
- ✓ Gasolina
- ✓ Trapos
- ✓ Brocha

Procedimiento

- ✓ Se prepara los tres moldes sobre una placa base y antes de colocar la muestra cada molde se cubre con una mezcla de vaselina y talco para evitar que la muestra se adhiera a los moldes.
- ✓ Una vez preparados los moldes la mezcla ya debió ser calentada con cuidado y evitar que exceda los 110°C . Esta muestra será colocada dentro de los moldes con un chorro delgado hacia atrás y hacia delante de extremo a extremo hasta el nivel de llenado, luego se deja enfriar a temperatura ambiente por un periodo superior a 30min y el exceso será sacado con una espátula.

Figura 3.37 Preparación de los moldes



Fuente: Elaboración propia

- ✓ Se procede a colocar los moldes en el baño de agua durante una hora a la temperatura de ensayo 25°C.

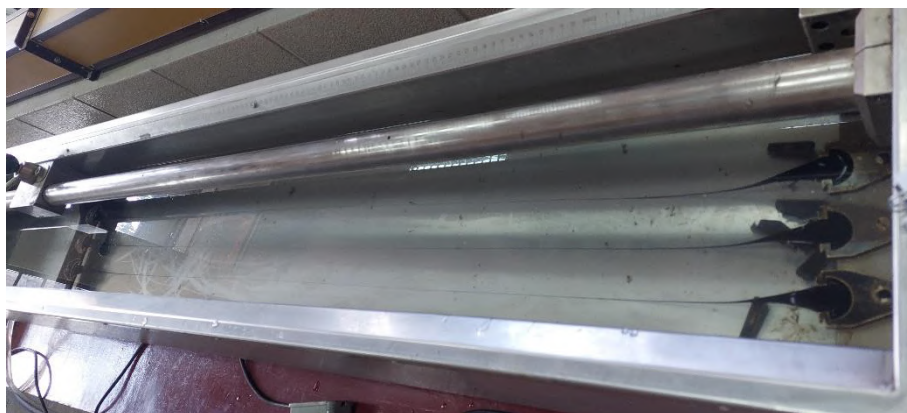
Figura 3.38 Colocación de los moldes en el baño María a temperatura de 25°C.



Fuente: Elaboración propia

- ✓ Una vez pasado el tiempo se retira la placa de abajo se separa las partes y se engancha en los anillos de cada extremo del ductilímetro y el dispositivo ira elongando la muestra a una velocidad constante, la muestra comienza a elongar donde la ductilidad de un asfalto debe ser superior a 100cm.

Figura 3.39 Medición de la elongación de las muestras de asfalto en el ductilímetro



Fuente: Elaboración propia

Resultados

Tabla 3.21 Tabla de resultados ductilidad

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Ductilidad a 25°C ASSHTO T-51	cm.	109,7	117,4	118,25	115	100	-

Fuente: Elaboración propia

3.3.5 Ensayo para determinar la inflamación de copa abierta de Cleveland

Este ensayo define la determinación de los puntos de inflamación y combustión por medio de la copa abierta de Cleveland.

Equipo

- ✓ Copa Abierta de Cleveland
- ✓ Soporte universal
- ✓ Termómetro
- ✓ Herramientas y accesorios

Procedimiento

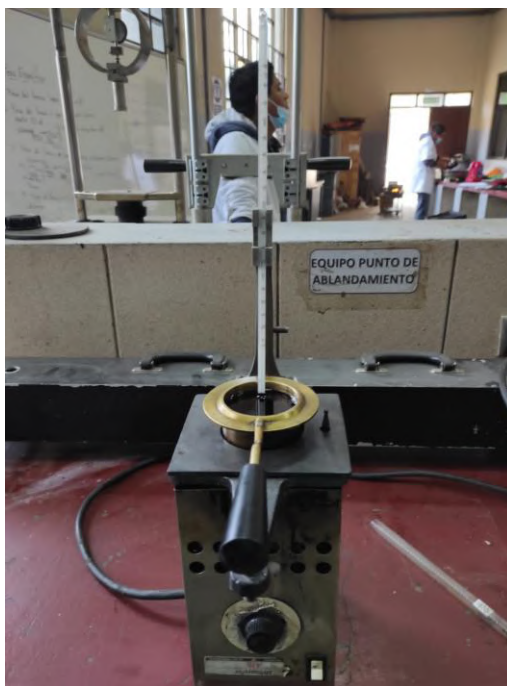
- ✓ Se llenará la copa a una temperatura conveniente no excediendo los 100°C. esta copa tiene un nivel hasta donde debe estar la muestra asfáltica.
- ✓ Colocado de la copa en su posición correspondiente en el equipo aplicar calor y esperar hasta que el asfalto suba a los 232 °C establecido como mínimo.
- ✓ Controlar la aparición del destello en cualquier punto de la superficie del material, pero no se debe confundir el verdadero destello con el halo azulado que algunas veces circunda la llama de prueba. Entonces se anotará la temperatura leída en el termómetro.
- ✓ Este ensayo se realizará tres veces.

Figura 3.40 Llenado de la Copa de Cleveland con M.A.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.41 Aplicación de calor a la copa de Cleveland con la M.A.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.42 Control de la temperatura en la copa de Cleveland



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.43 Control del destello y anotación de la temperatura en ese instante



Fuente: Elaboración propia

Resultados

Tabla 3.22 Resultados de Punto de Inflamación

Ensayo	Unidad	Muestras			Resultado	Especificaciones	
		1	2	3		Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48	°C	280	270	270	273	232	-

Fuente: Elaboración propia

3.4 Dosificación**✓ Calidad de los agregados****Tabla 3.23** Requisitos de calidad de agregados para mezclas asfálticas

Ensayo	Capa de superficie	Resultados de los agregados estudiados
Abrasión	máx. 40%	CUMPLE
Partículas Chatas y Alargadas	máx. 20%	CUMPLE
Porcentaje de absorción de agua	máx. 2%	CUMPLE
Equivalente de arena	mín. 50%	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

Los agregados triturados cumplen con los requisitos de calidad que especifica la norma ASTM D3515.

✓ Combinación de agregados

Se realizó combinaciones de agregados, de manera que cumplan con las especificaciones de la gradación para las cuatro mezclas asfálticas. Y por lo tanto esta combinación resultante de los agregados debe cumplir a la hora de calcular el contenido mínimo de cemento asfáltico que es el punto de partida en la dosificación de Marshall. Al finalizar estos ensayos deberán ser corregidas y firmadas las planillas por el docente encargado ver ANEXO VII.

- Combinación de agregados para mezclas asfálticas densas

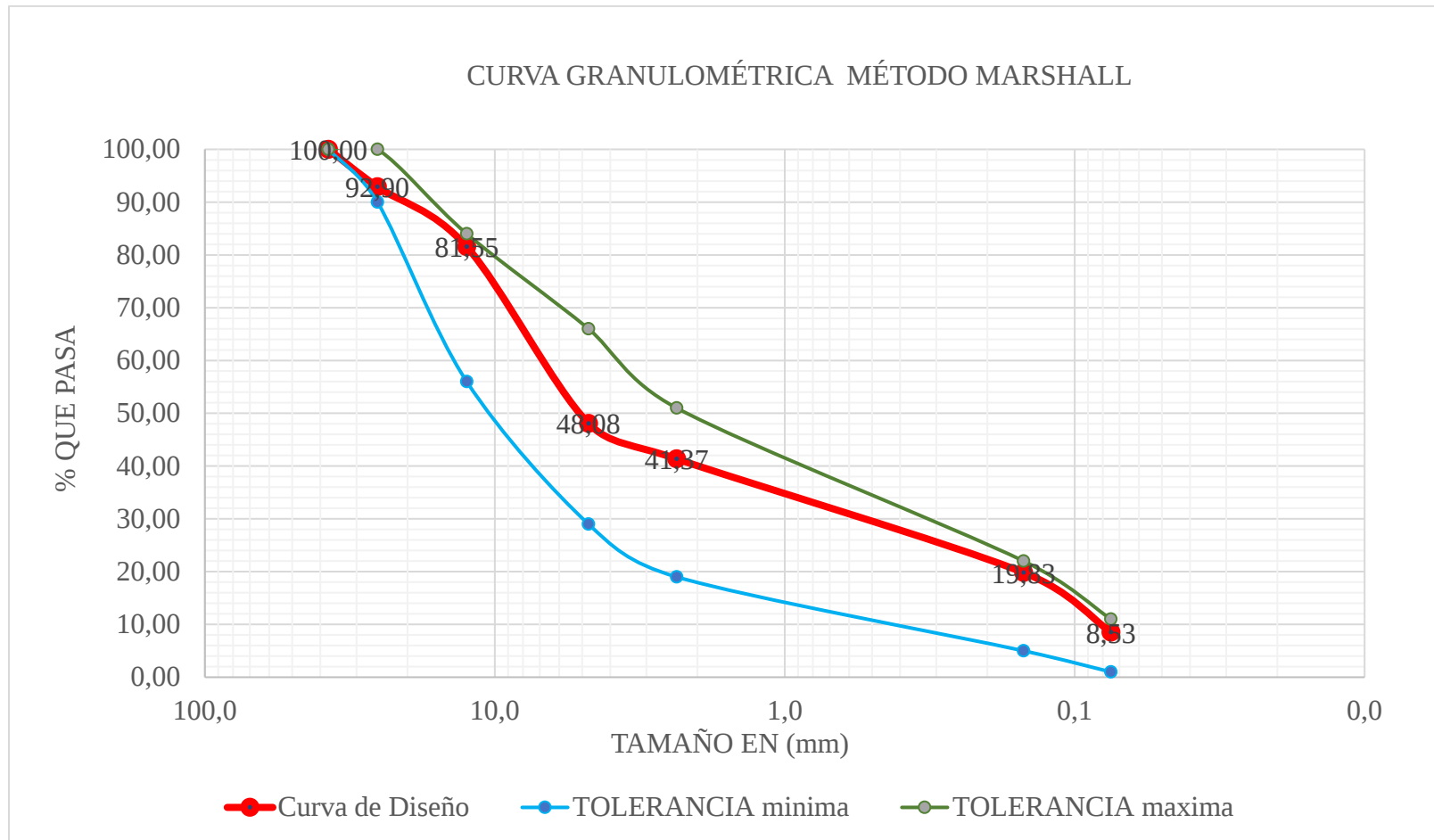
Para la gradación de agregados en mezclas finas y densas cumple para ambas mezclas por lo tanto en esta combinación lo que variara es la dosificación, se utilizó agregados obtenidos mediante trituración como ser grava (1”), gravilla (3/8”), arena (N.º 4) y filler (pasa tamiz N.º 200).

Tabla 3.24 Diseño granulométrico para una M.A. Densa

Tamiz	Tamaño (mm)	% Que pasa del total	Especificaciones ASTM D3515	
			Mínimo	Máximo
1½"	37,5	100,0	100	100
1"	25,4	92,9	90	100
¾"	19,0	89,8	-	-
½"	12,5	81,6	56	84
3/8"	9,50	68,0	-	-
¼"	6,35	57,7	-	-
Nº4	4,75	48,1	29	66
Nº8	2,36	41,4	19	51
N.º10	2,00	38,4	-	-
Nº30	0,60	32,0	-	-
N.º40	0,43	27,3	-	-
Nº50	0,30	19,8	5	22
Nº100	0,15	12,9	-	-
Nº200	0,075	8,5	1	11
BASE	-	0,0	-	-

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.44 Curva granulométrica para M.A. Densa



- **Contenido mínimo de cemento asfáltico para mezclas asfálticas densas.**

Al finalizar estos ensayos deberán ser corregidas y firmadas las planillas por el docente encargado ver ANEXO VIII.

- **Combinación de agregados para mezclas asfálticas finas**

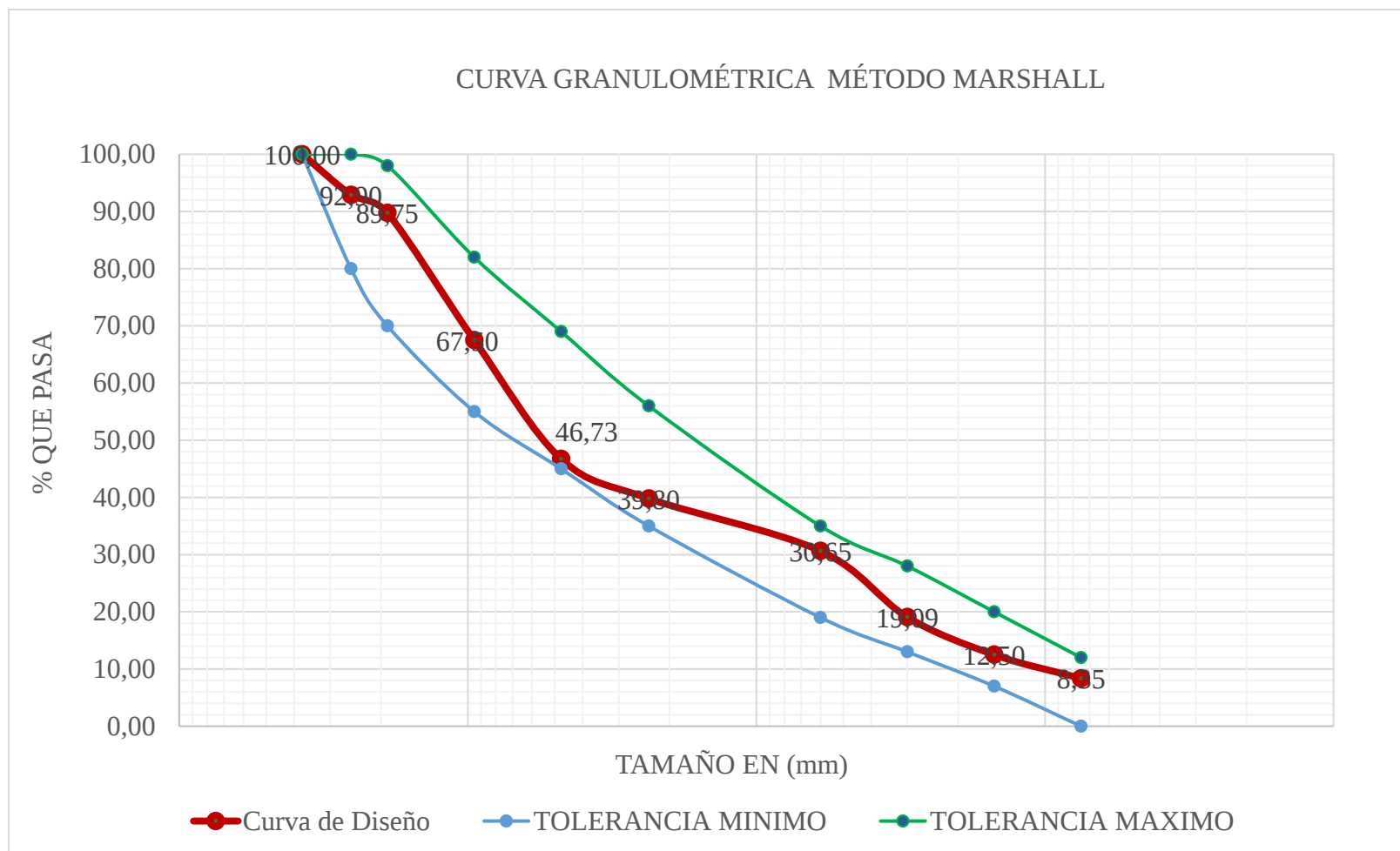
Los agregados utilizados en esta combinación son los mismos que son estudiados en la mezcla asfáltica densa. Se utilizo grava triturada (1”), gravilla (3/8”), arena (N.º 4) y filler (pasa tamiz N.º 200).

Tabla 3.25 Diseño granulométrico para una M.A. Fina

Tamiz	Tamaño (mm)	% Que pasa del total	Especificaciones ASTM D3515	
			Mínimo	Máximo
1½"	37,5	100,00	100	100
1"	25,4	92,90	80	100
¾"	19,0	89,75	70	98
½"	12,5	81,55	-	-
3/8"	9,50	67,50	55	82
¼"	6,35	56,68	-	-
Nº4	4,75	46,73	45	69
Nº8	2,36	39,80	35	56
N.º10	2,00	36,73		-
Nº30	0,60	30,65	19	35
N.º40	0,43	26,15		-
Nº50	0,30	19,09	13	28
Nº100	0,15	12,50	7	20
Nº200	0,075	8,35	0	12
BASE	-	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.45 Curva granulométrica para una M.A. Fina



Fuente: Elaboración propia

- **Contenido mínimo de cemento asfáltico para mezclas asfálticas finas**

Al finalizar estos ensayos deberán ser corregidas y firmadas las planillas por el docente encargado ver ANEXO VIII.

- **Combinación de agregados para mezclas asfálticas abiertas**

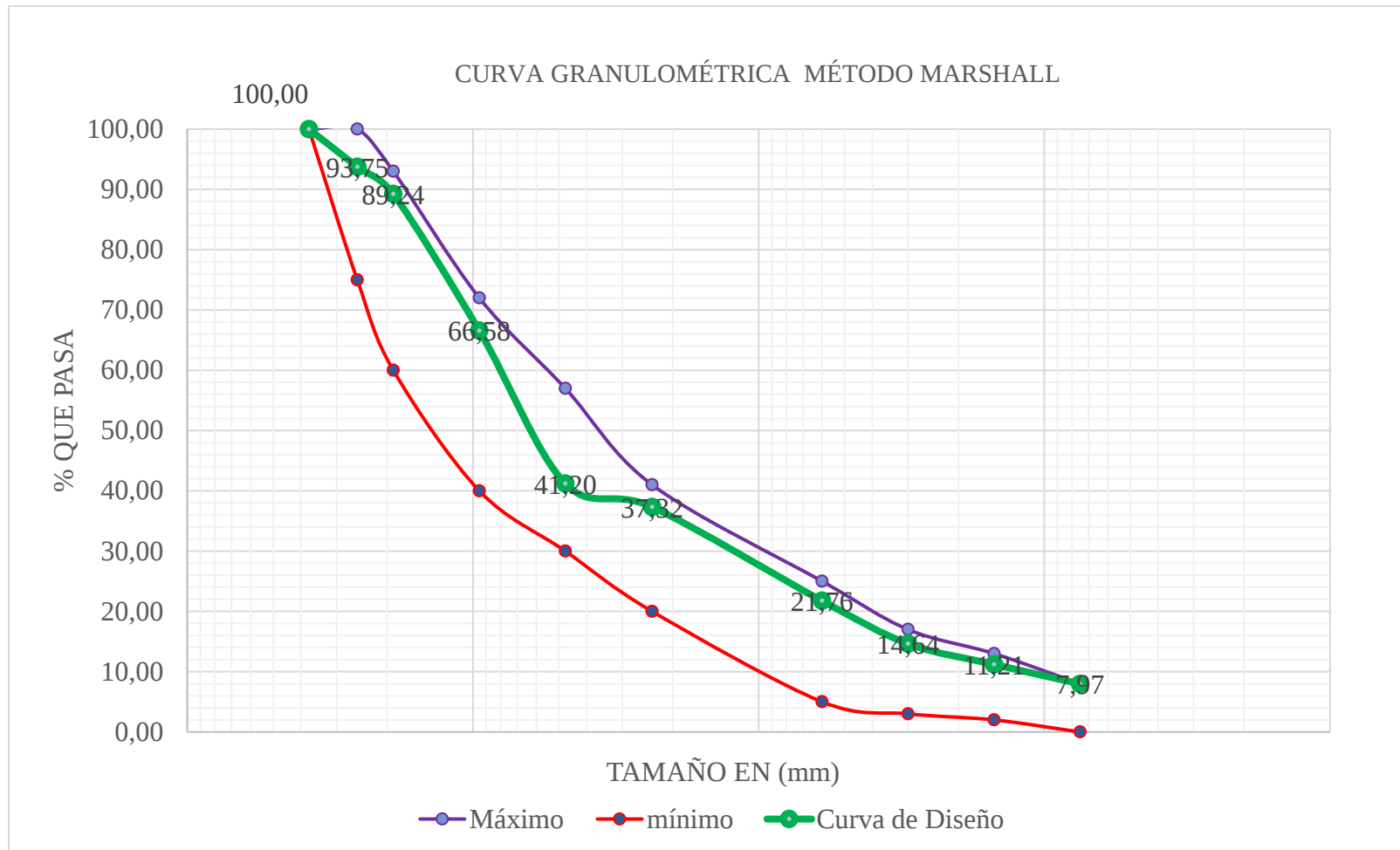
En esta combinación los agregados utilizados en mezclas densas y finas no cumplen para este tipo de gradación por lo tanto se trabajó con otro banco de agregados triturados donde se requirió el uso de cuatro agregados entre ellos grava (1”), gravilla (3/8”), arena (N.º 4) y filler (pasa tamiz N.º 200 como agregado natural).

Tabla 3.26 Diseño granulométrico para una M.A. Abierta

Tamiz	Tamaño (mm)	% Que pasa del total	Especificaciones ASTM D3515	
			Mínimo	Máximo
1½"	37,5	100,00	100	100
1"	25,4	93,75	75	100
¾"	19,0	89,24	60	93
½"	12,5	82,09	-	-
3/8"	9,50	66,58	40	72
¼"	6,35	53,45	-	-
Nº4	4,75	41,20	30	57
Nº8	2,36	37,32	20	41
N.º10	2,00	33,40	-	-
Nº30	0,60	21,76	5	25
N.º40	0,43	18,38	-	-
Nº50	0,30	14,64	3	17
Nº100	0,15	11,21	2	13
Nº200	0,075	7,97	0	8
BASE	-	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.46 Curva granulométrica para una M.A. Abierta



Fuente: Elaboración propia

- **Contenido mínimo de cemento asfáltico para mezclas asfálticas abiertas**

Es el contenido mínimo con el que se preparará los especímenes en Marshall para mezclas abiertas.

Al finalizar estos ensayos deberán ser corregidas y firmadas las planillas por el docente encargado ver ANEXO VIII.

- **Combinación de agregados para mezclas asfálticas drenantes o porosas**

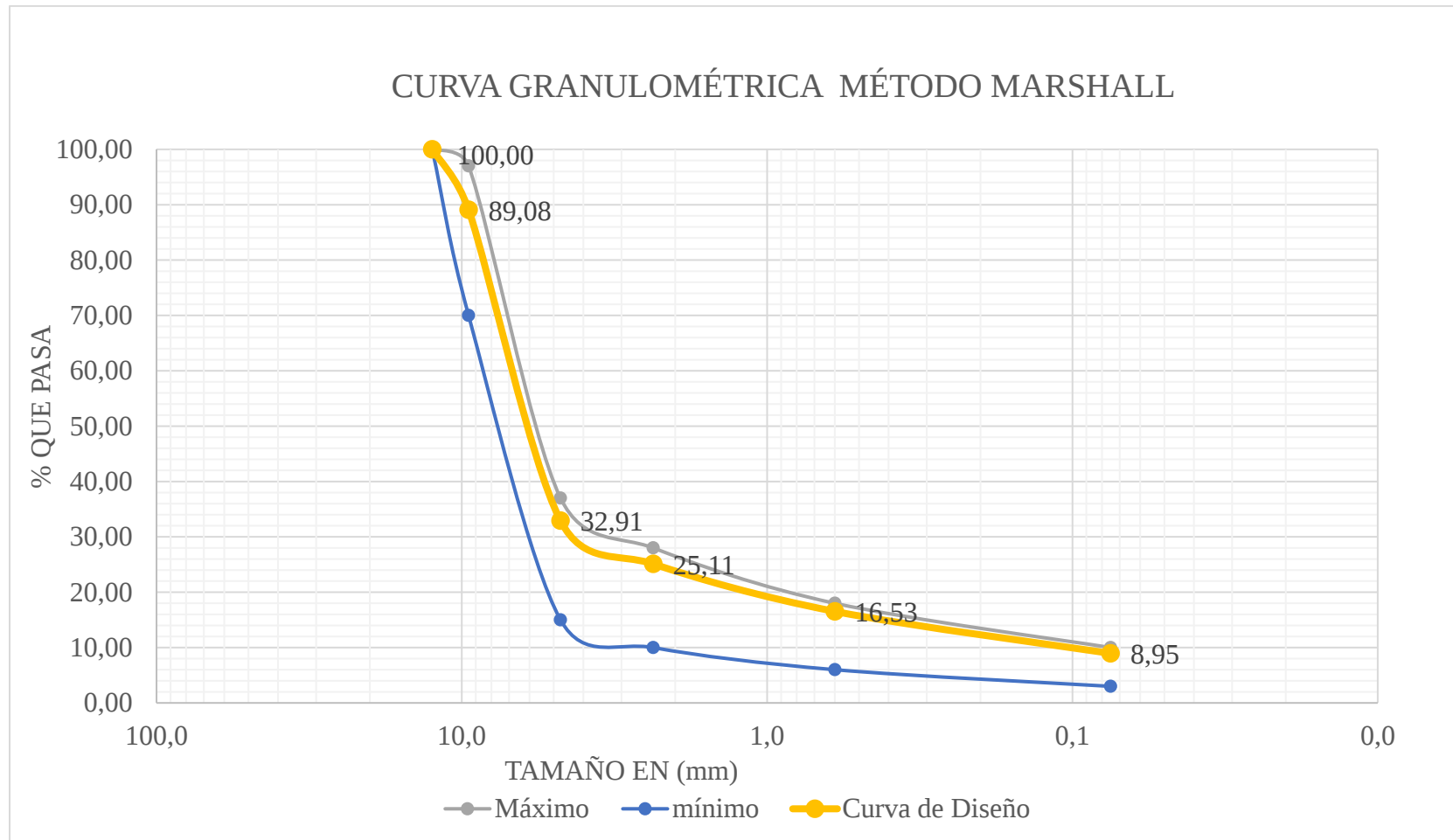
Para la combinación de este tipo de mezcla asfáltica no se utilizó la gradación de mezclas densas y mucho menos para mezclas abiertas debido a que no cumple con la gradación que requiere este tipo de mezcla asfáltica. En este tipo de gradación se eligió otro banco que contenga los agregados obtenidos mediante trituración para esto se trabajó con gravilla (3/8”), arena (N.º 4) y filler (pasa tamiz N.º 200).

Tabla 3.27 Diseño granulométrico para una M.A. Drenante

Tamiz	Tamaño (mm)	% Que pasa del total	Especificaciones ASTM D3515	
			Mínimo	Máximo
1/2"	12,5	100,00	100	100
3/8"	9,50	89,08	70	97
1/4"	6,35	69,88	-	-
Nº4	4,75	32,91	15	37
Nº8	2,36	25,11	10	28
N.º10	2,00	24,77	-	-
Nº30	0,60	16,53	6	18
N.º40	0,43	11,49	-	-
Nº50	0,30	10,80	-	-
Nº100	0,15	9,08	-	-
Nº200	0,075	8,951	3	10
BASE	-	0,00	-	-

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.47 Curva granulométrica para una M.A. Drenante



Fuente: Elaboración propia

- **Contenido mínimo de cemento asfáltico para mezclas asfálticas drenantes o porosas.**

Al finalizar estos ensayos deberán ser corregidas y firmadas las planillas por el docente encargado ver ANEXO VIII.

Figura 3.48 Contenido mínimo de las mezclas asfálticas estudiadas

Mezcla Asfáltica	Contenido mínimo (%)
M.A. Densa	4,83 %
M.A. Fina	4,68 %
M.A. Abierta	4,07 %
M.A. Drenante o Porosa	4,16 %

Fuente: Elaboración propia

✓ **Contenido óptimo de cemento asfáltico**

Al finalizar estos ensayos deberán ser corregidas y firmadas las planillas por el docente encargado ver ANEXO IX.

✓ **Para mezclas asfálticas densas:**

Ponderación de Grava (%) =	35,00
Ponderación de Gravilla (%) =	20,00
Ponderación de Arena (%) =	40,00
Ponderación de filler (%) =	5,00
Total (%) =	100,00
Cmin (%) =	4,83 %

Tabla 3.28 Dosificación de M.A. Densas para 5 probetas

	PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO EN LA MEZCLA					
	Cmin - 1%	Cmin	Cmin +0,5%	Cmin +1 %	Cmin +1,5 %	Cmin +2%
	3,83%	4,83%	5,33%	5,83%	6,33%	6,83%
Porcentaje de Agregado (%)	96,17%	95,17%	94,67%	94,17%	93,67%	93,17%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	45,91	57,91	63,91	69,91	75,91	81,91
Peso de Grava (gr) *	403,93	399,73	397,63	395,53	393,43	391,33
Peso de Gravilla (gr) *	230,82	228,42	227,22	226,02	224,82	223,62
Peso de Arena (gr) *	461,64	456,84	454,44	452,04	449,64	447,24
Peso del Filler (gr) *	57,70	57,10	56,80	56,50	56,20	55,90
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

✓ **Para mezclas asfálticas finas:**

Ponderación de Grava (%) = 35,00

Ponderación de Gravilla (%) = 22,00

Ponderación de Arena (%) = 38,00

Ponderación de filler (%) = 5,00

Total (%) = 100

Cmin (%) = 4,68 %

Tabla 3.29 Dosificación de M.A. Finas para 5 probetas

	PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO EN LA MEZCLA					
	Cmin - 1%	Cmin	Cmin +0,5%	Cmin +1 %	Cmin +1,5 %	Cmin +2%
	3,68%	4,68%	5,18%	5,68%	6,18%	6,68%
Porcentaje de Agregado (%)	96,32%	95,32%	94,82%	94,32%	93,82%	93,32%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	44,20	56,20	62,20	68,20	74,20	80,20
Peso de Grava (gr) *	404,53	400,33	398,23	396,13	394,03	391,93
Peso de Gravilla (gr) *	254,28	251,64	250,32	249,00	247,68	246,36
Peso de Arena (gr) *	439,20	434,64	432,36	430,08	427,80	425,52
Peso del Filler (gr) *	57,79	57,19	56,89	56,59	56,29	55,99
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

✓ **Para mezclas asfálticas abiertas:**

Ponderación de Grava (%) = 30,00

Ponderación de Gravilla (%) = 30,00

Ponderación de Arena (%) = 35,00

Ponderación de filler (%) = 5

Total (%) = 100

Cmin (%) = 4,07 %

Tabla 3.30 Dosificación de M.A. Abiertas para 5 probetas

	PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO EN LA MEZCLA					
	Cmin - 1%	Cmin	Cmin +0,5%	Cmin +1 %	Cmin +1,5 %	Cmin +2%
	3,07%	4,07%	4,57%	5,07%	5,57%	6,07%
Porcentaje de Agregado (%)	96,93%	95,93%	95,43%	94,93%	94,43%	93,93%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	36,84	48,84	54,84	60,84	66,84	72,84
Peso de Grava (gr) *	348,95	345,35	343,55	341,75	339,95	338,15
Peso de Gravilla (gr) *	348,95	345,35	343,55	341,75	339,95	338,15
Peso de Arena (gr) *	407,11	402,91	400,81	398,71	396,61	394,51
Peso del Filler (gr) *	58,16	57,56	57,26	56,96	56,66	56,36
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

✓ **Para mezclas asfálticas drenantes o porosas:**

Ponderación de Gravilla (%) = 56,50

Ponderación de Arena (%) = 38,50

Ponderación de filler (%) = 5

Total (%) = 100

Cmin (%) = 4,16 %

Tabla 3.31 Dosificación de M.A. Drenantes para 5 probetas

	PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO EN LA MEZCLA					
	Cmin - 1%	Cmin	Cmin +0,5%	Cmin +1 %	Cmin +1,5 %	Cmin +2%
	3,16%	4,16%	4,66%	5,16%	5,66%	6,16%
Porcentaje de Agregado (%)	96,84%	95,84%	95,34%	94,84%	94,34%	93,84%
Peso del Cemento Asfáltico (gr) *	37,96	49,96	55,96	61,96	67,96	73,96
Peso de Grava (gr) *	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Peso de Gravilla (gr) *	656,55	649,77	646,38	642,99	639,60	636,21
Peso de Arena (gr) *	447,39	442,77	440,46	438,15	435,84	433,53
Peso del Filler (gr) *	58,10	57,50	57,20	56,90	56,60	56,30
Peso total de la briqueta (gr) *	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Fuente: Elaboración propia

3.5 Elaboración de probetas

El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1”) o menor. El tamaño del molde no debe exceder el diámetro de 4 pulg. (101,6mm). Al finalizar estos ensayos deberán ser corregidas y firmadas las planillas por el docente encargado ver ANEXO X.

Equipo de laboratorio

- ✓ Molde de compactación: diámetro de 4pulg. Y altura aproximadamente de 6 pulg.
- ✓ Martillo de compactación
- ✓ Compactadora automática de Marshall
- ✓ Soporte para molde
- ✓ Mordaza
- ✓ Medidor de deformación
- ✓ Máquina de estabilidad de Marshall con anillo de carga
- ✓ Baño maría para medir las alturas debe de estar a 25°C y para estabilidad debe de estar a 60°C.
- ✓ Cocina esqueleto para el calentado de los agregados a una temperatura mayor a 135°C.
- ✓ Termómetro
- ✓ Calibrador Vernier
- ✓ Papel filtrante de 4pulg. De diámetro para colocar en los moldes antes de colocar la mezcla asfáltica.
- ✓ Balanza
- ✓ Guantes de cuero
- ✓ Pintura para identificar las probetas
- ✓ Bandejas para el mezclado de los agregados con el cemento asfáltico
- ✓ Espátula
- ✓ Cucharas
- ✓ Martillo
- ✓ Taras para el pesado de cemento asfáltico para cada probeta

Evaluación de agregados

El agregado paso los controles de calidad como se especifica en el punto 3.4. por lo tanto, se realizó la combinación de agregados, gravedad especifica y absorción. Esta granulometría para cada mezcla asfáltica se encuentra dentro de los rangos de diseño que establece la norma.

Se calculo la gravedad especifica Bulk del agregado grueso y la gravedad específica de los agregados combinados.

Evaluación del cemento asfáltico

Se determino el contenido mínimo de asfalto a emplear según el tipo y ubicación de los agregados.

Se procedió a calcular la gravedad especifica del cemento asfáltico esto se demostró en el punto 3.3.3. del presente documento.

Preparación de los especímenes Marshall

- ✓ Las muestras calientes de agregados se mezclan en un rango desde -1% del cemento mínimo hasta el +2% al cemento mínimo esto para lograr obtener mi contenido optimo al final.
- ✓ Los especímenes de cada mezcla asfáltica se compacto a los 75 golpes en cada lado con la compactadora automática de Marshall.
- ✓ Se preparo tres muestras para cada contenido de cemento asfáltico. Se prepararon 15 probetas para cada tipo de mezcla asfáltica un total de 60 probetas.
- ✓ Luego de compactar cada espécimen se deja enfriar por 10 minutos y luego se procedió a sacar el espécimen con el extractor de muestras de asfaltos.
- ✓ Cada muestra se procede a medirla cuatro veces su altura con un vernier calibrado. Luego de ser medido cada muestra esta fue pesada al aire W_D , respectivamente se deja sumergida en un baño María a 25°C por 5 minutos se procede a secarlas superficialmente y pesarlas (W_{SSD}), luego se procede a sumergirlas en una canastilla se las pesa y se las retira y se anotó como peso sumergido este último dato (W_{sum}).
- ✓ Con estos datos obtenido se calcula la gravedad especifica Bulk de cada espécimen.

$$Gmb = \frac{W_D}{W_{SSD} - W_{SUM}}$$

Densidad y vacíos de los especímenes

- ✓ Se calculará la densidad teórica con los siguientes datos obtenidos de la combinación de agregados.

$$D = \frac{100}{\frac{Pg}{Dg} + \frac{Pf}{Df} + \frac{Pa}{Da}}$$

Donde:

D= densidad teórica

Pg= % material grueso

Pf= % material fino

Pa= % cemento asfáltico

Dg= densidad relativa del material grueso

Df= densidad relativa del material fino

Da= densidad relativa del cemento asfáltico (CA)

$$Pa + Pf + Pg = 100\%$$

Pg'' = % retenido 1/4''

Pf'' = % pasa 1/4''

$$Pg = \frac{Pg''(100 - Pa)}{100}$$

$$Pf = \frac{Pf''(100 - Pa)}{100}$$

- ✓ Se calcula el porcentaje de vacíos utilizando la densidad teórica y Gmb (gravedad específica Bulk del espécimen)

$$\%V = \frac{D - \gamma}{D} * 100$$

Donde:

%V= porcentaje de vacíos de cada espécimen

D= densidad teórica de cada espécimen

γ= gravedad específica Bulk de cada espécimen

- ✓ Se calcula el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) para cada espécimen Marshall.

$$VMA = 1 - \frac{Gmb * (1 - Pa)}{Gsb} * 100$$

Donde:

VMA= porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Gmb= gravedad específica Bulk de cada espécimen

Gsb= gravedad específica seca de la combinación de agregados

- ✓ Se calcula el porcentaje de vacíos llenos de asfalto para espécimen Marshall usando %V y VMA.

$$RBV = \frac{VMA - \%V}{VMA} * 100$$

Estabilidad Marshall y ensayo de flujo

- ✓ Se debe calentar el agua del baño María a 60°C y colocar los especímenes a ser ensayados por un período de 30 minutos. Los especímenes se ubicarán de manera escalonada de 8 en 8 para que todos los especímenes sean calentados el tiempo especificado antes de ser ensayados.
- ✓ Se deben limpiar perfectamente las superficies interiores de las mordazas de rotura y se coloca papel periódico de 6,2cm aproximadamente para cada espécimen para que la mordaza superior se deslice libremente.
- ✓ Luego de calentarlos el tiempo necesario, se irán sacando uno a la vez, y estos serán cubiertos por un papel periódico de la misma altura del espécimen y de esta manera colocarlo en la mordaza Marshall.
- ✓ Colocar el medidor de flujo sobre la barra guía marcada y compruebe la lectura inicial. Aplicar la carga a una velocidad de deformación hasta que ocurra la falla, es decir cuando se alcanza la máxima carga y luego disminuye según se lea en el dial respectivo.
- ✓ El punto de rotura se define como la carga máxima obtenida y se registra como el valor de estabilidad Marshall, expresado mm. Mientras se está determinando la estabilidad se mantiene firmemente el medidor de deformación en su posición sobre la barra guía; libérese cuando comience a decrecer la carga y anote la lectura. Este será el valor del “flujo” para la muestra expresado en centésimas de pulgada.
- ✓ Se repite los anteriores pasos hasta que todos los especímenes sean ensayados.
- ✓ El tiempo total transcurrido entre sacar el espécimen del baño y aplicar la carga es de 1 a 3 minutos como máximo.

Figura 3.49 Máquina de Marshall



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.50 Mordaza para rotura de especímenes Marshall



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.51 Extractor de muestras de asfaltos



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.52 Muestras de las diferentes mezclas asfálticas estudiadas



Fuente: Elaboración propia

Resultados del ensayo

Se gráfica:

1. Contenido de asfalto Vs. Densidad
2. Contenido de asfalto Vs. Estabilidad Marshall
3. Contenido de asfalto Vs. Fluencia
4. Contenido de asfalto Vs. Porcentaje de vacíos, % V
5. Contenido de asfalto Vs. Porcentaje de vacíos del agregado mineral, VMA
6. Contenido de asfalto Vs. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto, R.B.V.

Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico

- ✓ Determine el contenido de asfalto correspondiente a la medida especificada del contenido de vacíos (4% típicamente). Este es el óptimo contenido de asfalto.
- ✓ Determine las siguientes propiedades en el óptimo contenido de asfalto de los gráficos:
 - Estabilidad Marshall
 - Fluencia
 - Porcentaje de vacíos del agregado mineral, VMA
 - Porcentaje de vacíos llenos de asfalto, R.B.V.
- ✓ Compare cada uno de estos valores de especímenes y si todos tiene el rango especificado, entonces el óptimo contenido de asfalto determinado es satisfactorio. Si algunas de estas propiedades están fuera del rango de especificaciones, la mezcla debe ser rediseñada.

Tabla 3.32 Diseño Marshall para mezclas asfálticas densas

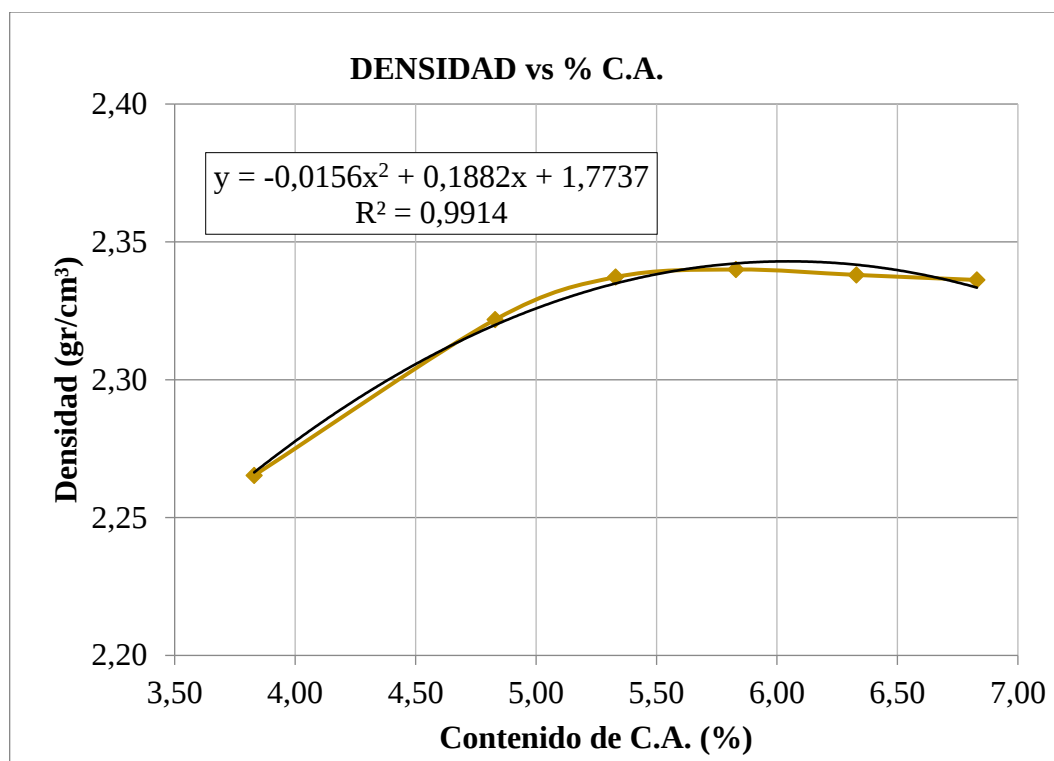
Criterio Mezclas Método Marshall	Tráfico					
	Ligero		Medio		Pesado	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Compactación N.º golpes/cara	35		50		75	
Estabilidad, lb(N)	750 (333)		1200 (5333)		1800 (8000)	
Flujo 0.01 Pulg (0.25mm)	8	18	8	16	8	14
Vacíos de aire, %	3	5	3	5	3	5

Fuente: Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot Mix Types. The Asphalt Institute, MS-2, May 1984

Curvas método Marshall para el contenido óptimo de cemento asfáltico

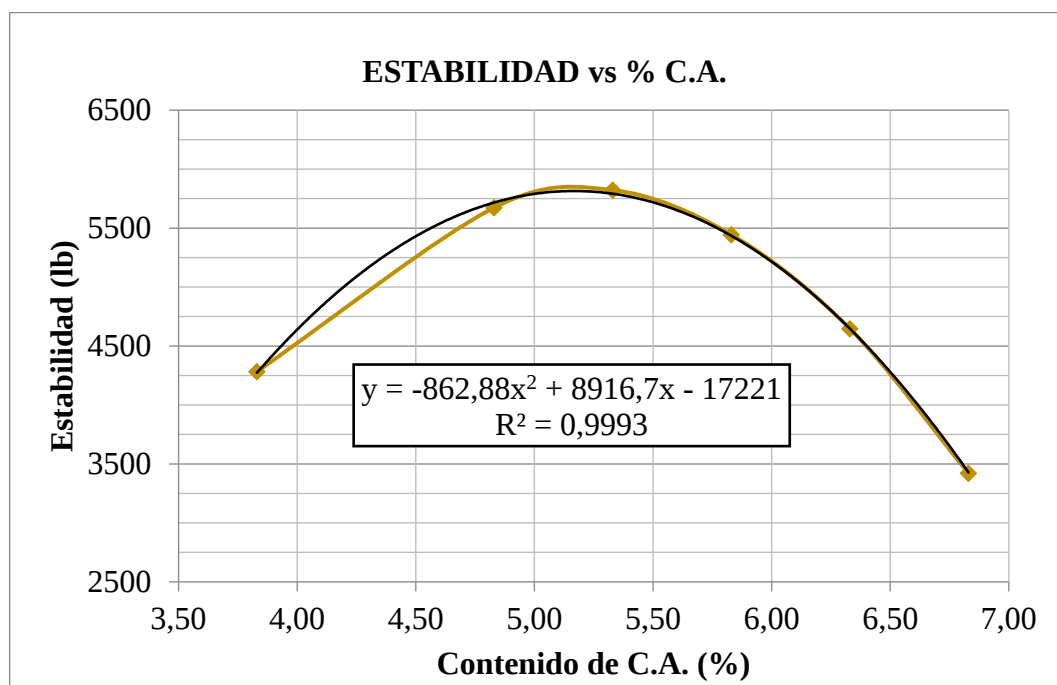
✓ Para mezclas asfálticas densas

Figura 3.53 M.A. Densa: Densidad vs % C.A.



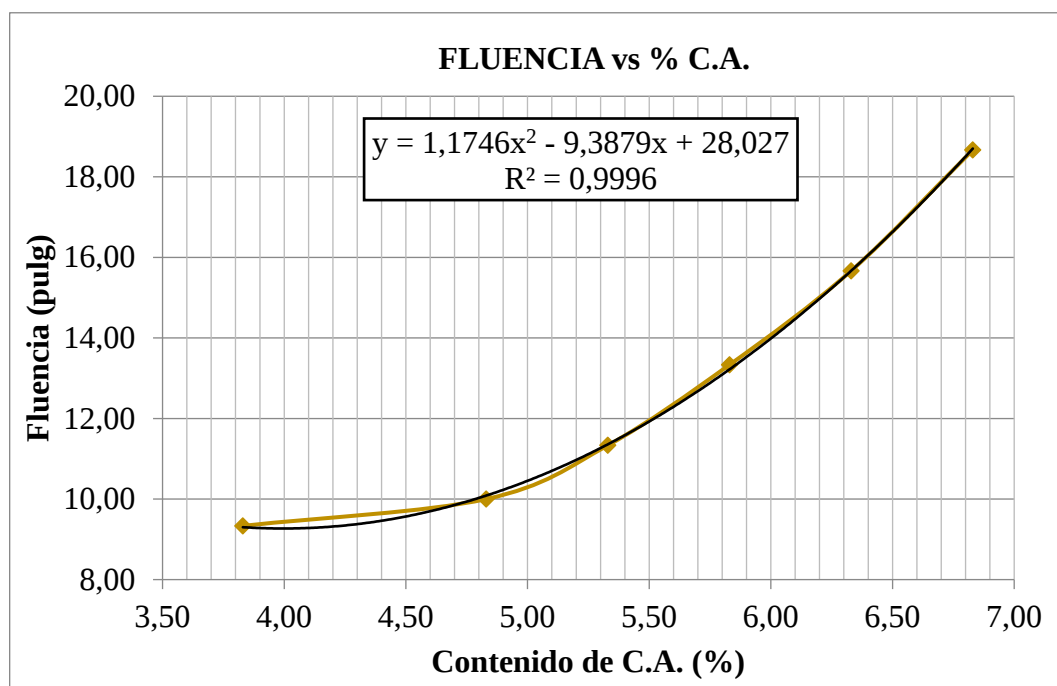
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.54 M.A. Densa: Estabilidad vs % C.A.



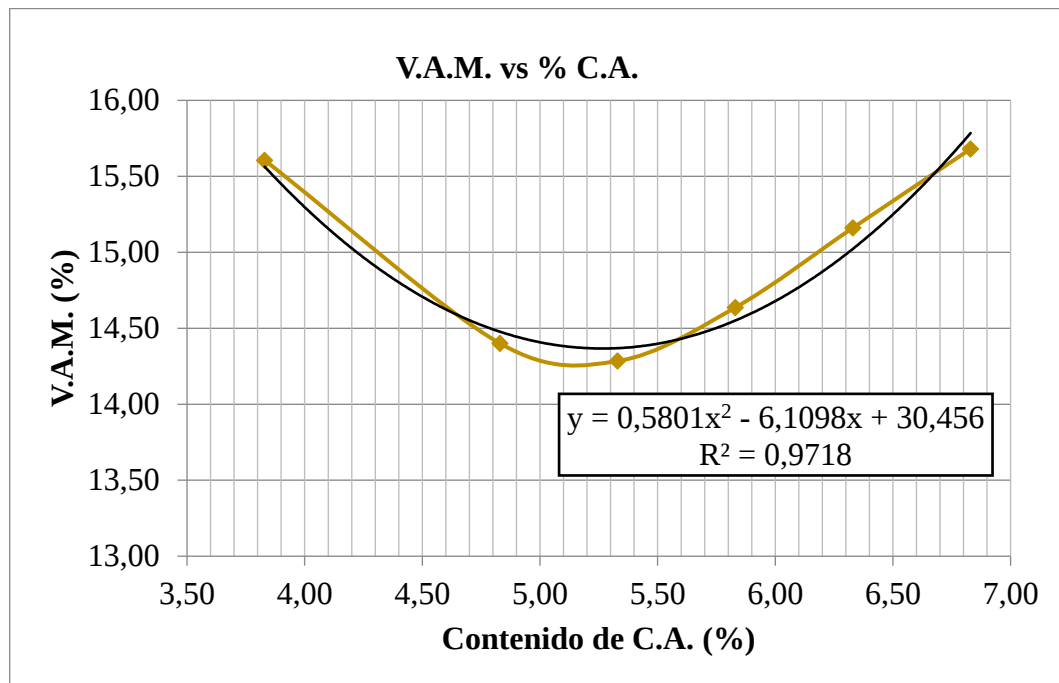
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.55 M.A. Densa: Fluencia vs % C.A.



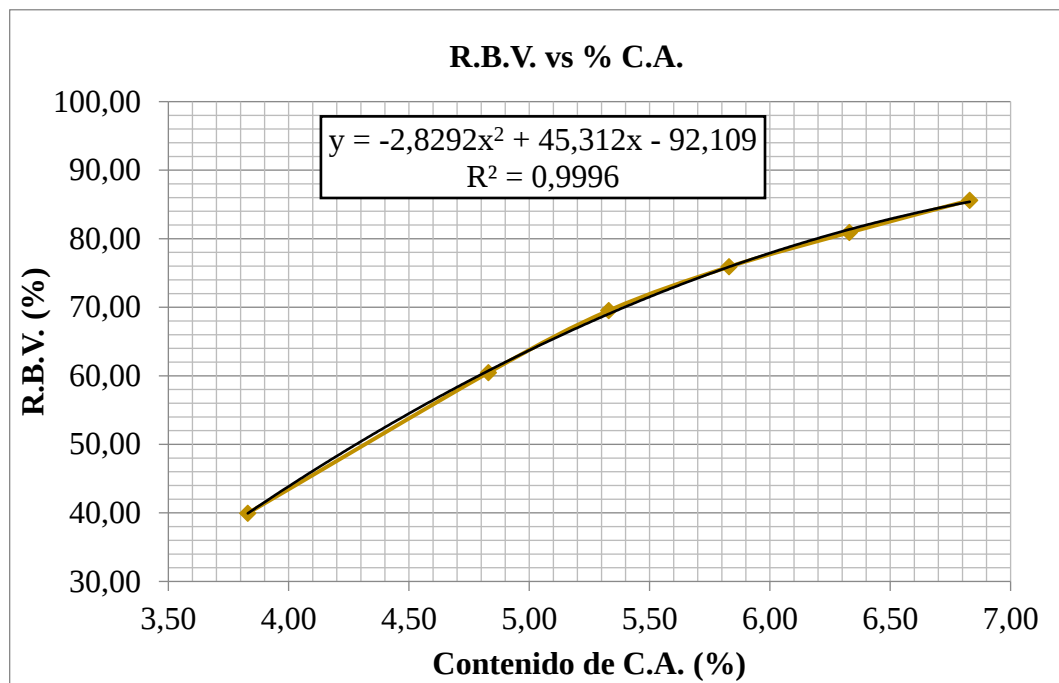
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.56 M.A. Densa: V.A.M. vs % C.A.



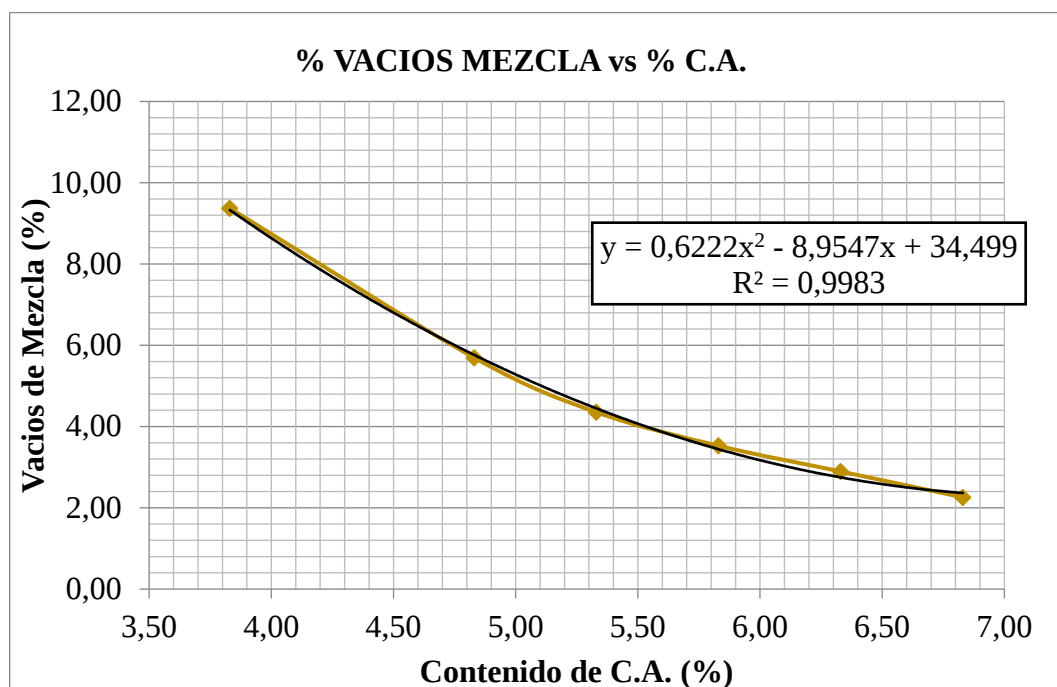
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.57 M.A. Densa: R.B.V. vs % C.A.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.58 M.A. Densa: % Vacíos mezcla vs % C.A.



Fuente: Elaboración propia

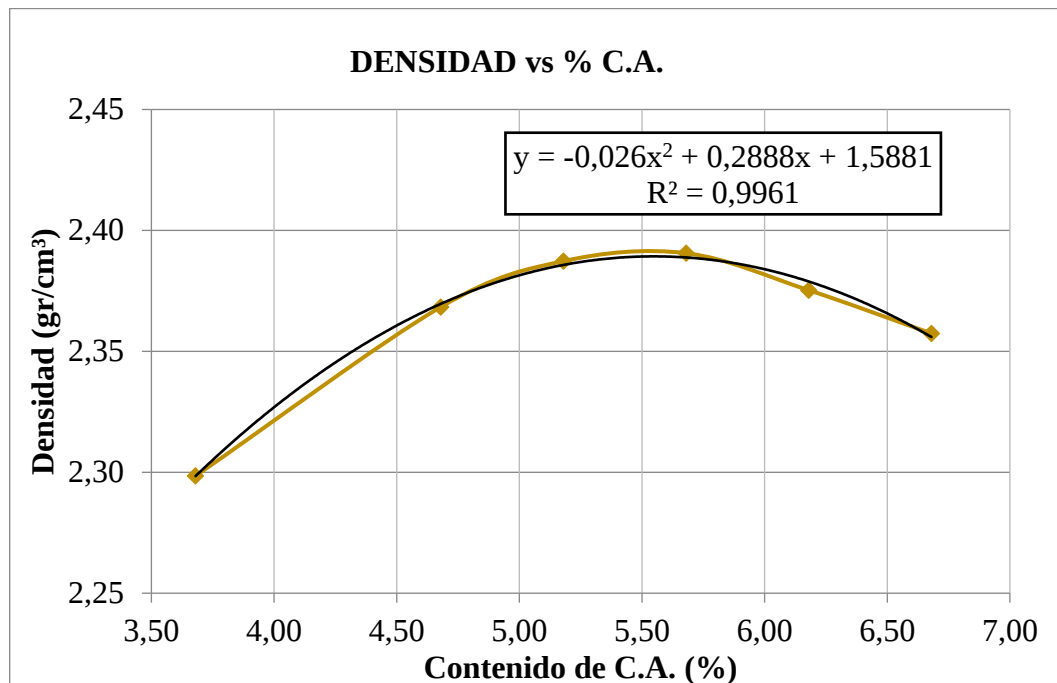
Tabla 3.33 Porcentaje óptimo de asfalto M.A. Densa

Propiedad	Valor máximo según ecuación	% de C.A.	% Óptimo de C.A. a 135°C 3-6% ASTM D315
Estabilidad Marshall (Lb)	5814,02	5,17	5,71 %
Densidad (gr/cm ³)	2,34	6,06	
% Vacíos de la mezcla	4,00	5,50	
R.B.V.	78,50	6,09	
V.A.M.	14,34	5,29	
Fluencia	11,00	5,25	

Fuente: Elaboración propia

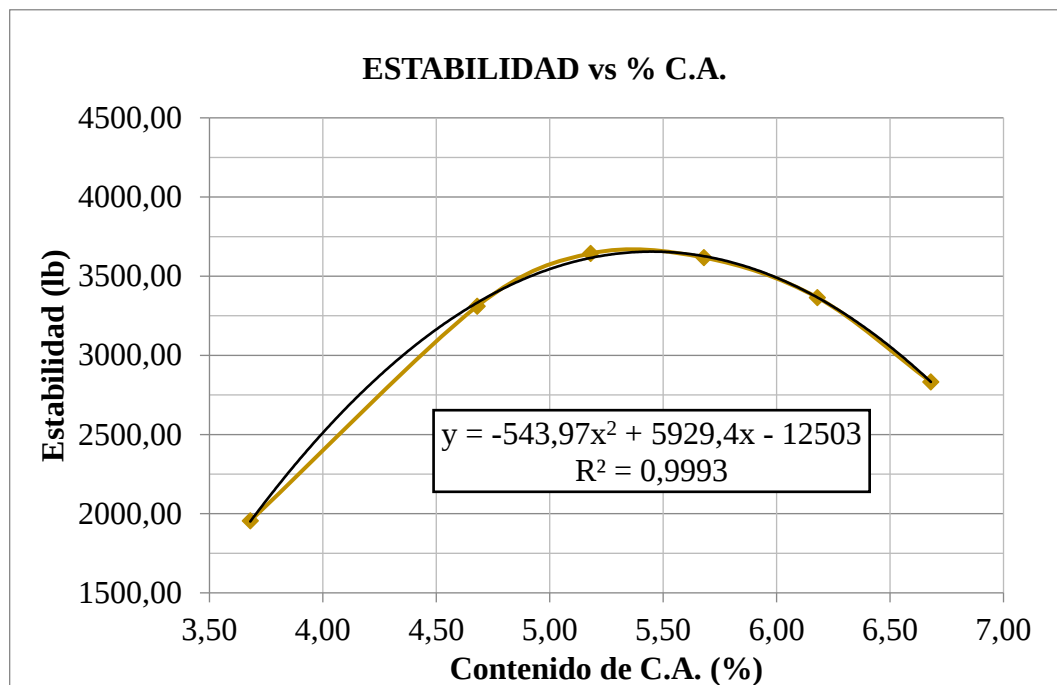
✓ Para mezclas asfálticas finas

Figura 3.59 M.A. Fina: Densidad vs %C.A.



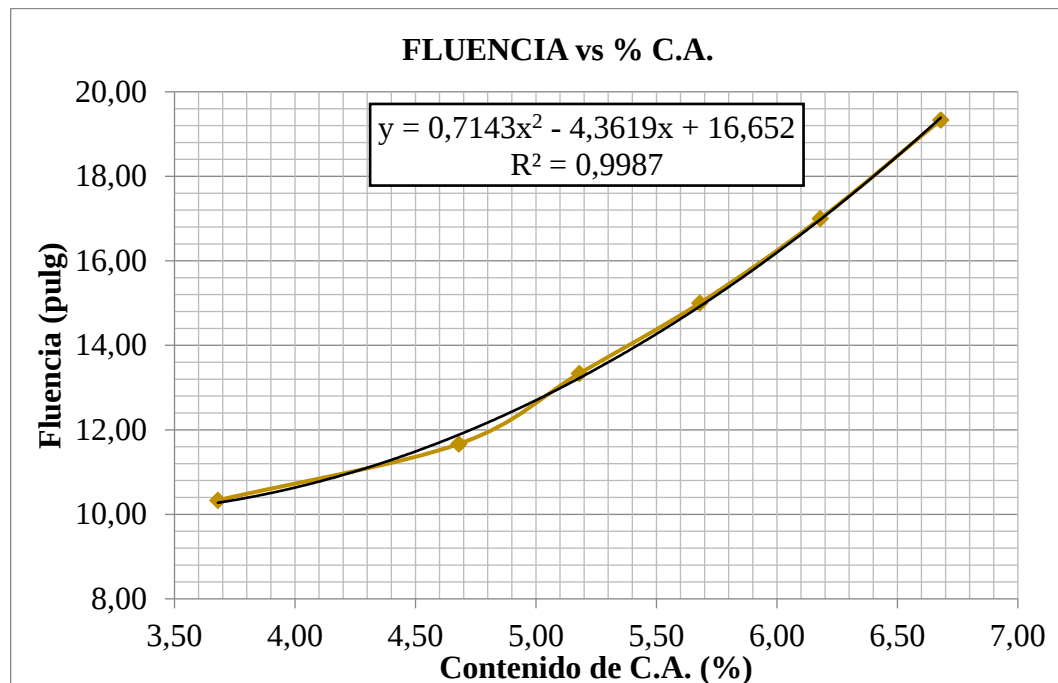
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.60 M.A. Fina: Estabilidad vs % C.A.



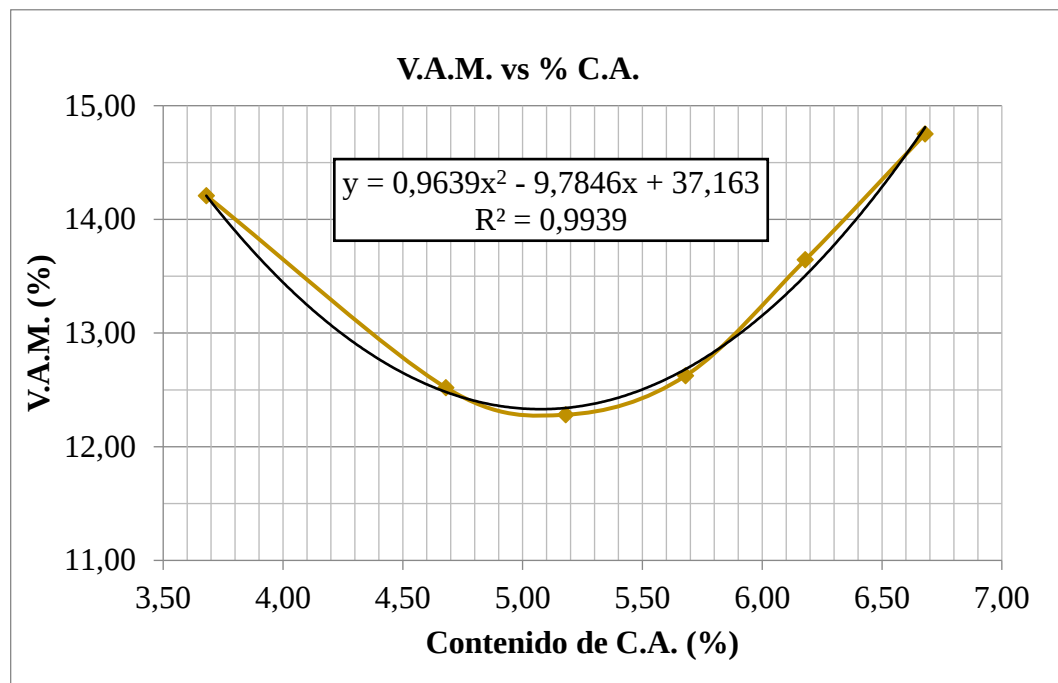
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.61 M.A. Fina: Fluencia vs % C.A.



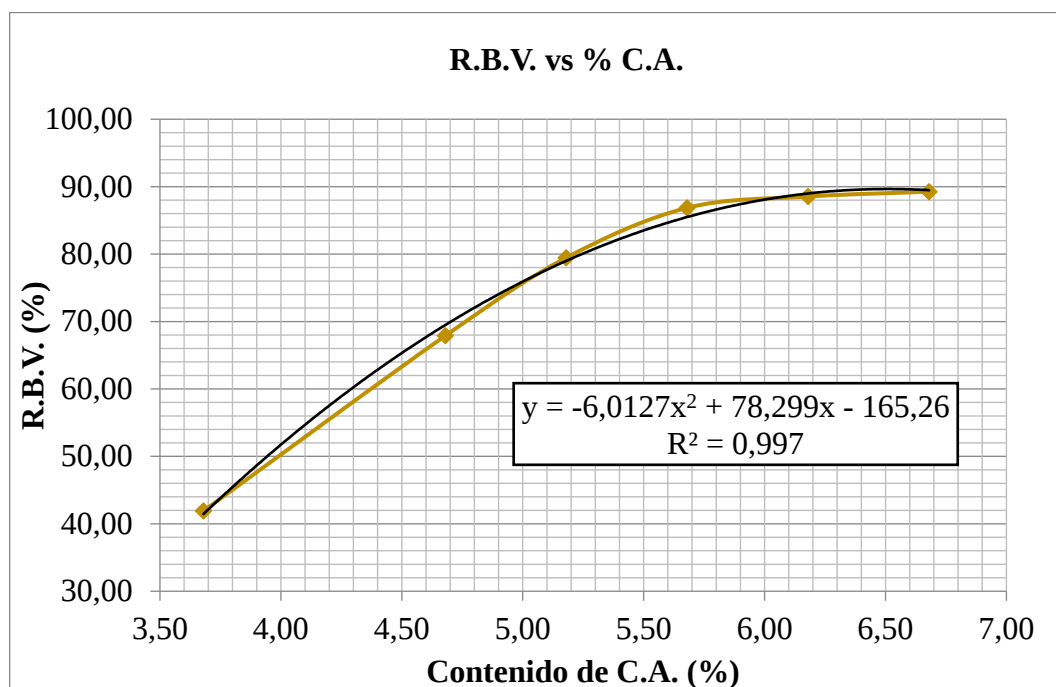
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.62 M.A. Fina: V.A.M. vs % C.A.



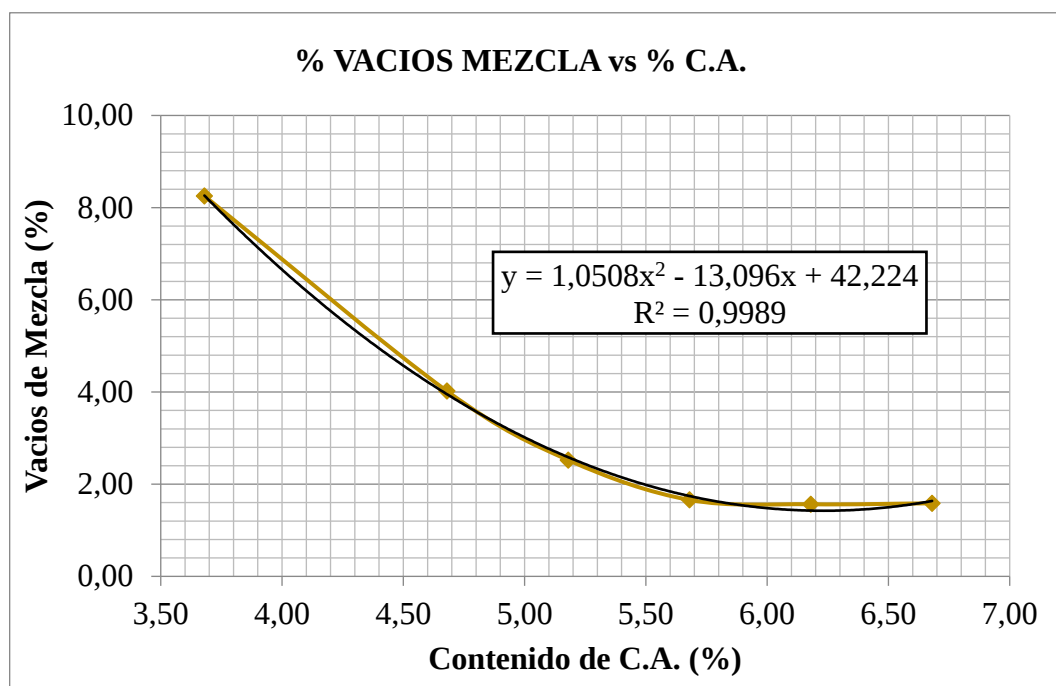
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.63 M.A. Fina: R.B.V. vs % C.A.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.64 M.A. Fina: % Vacíos Mezcla vs % C.A.



Fuente: Elaboración propia

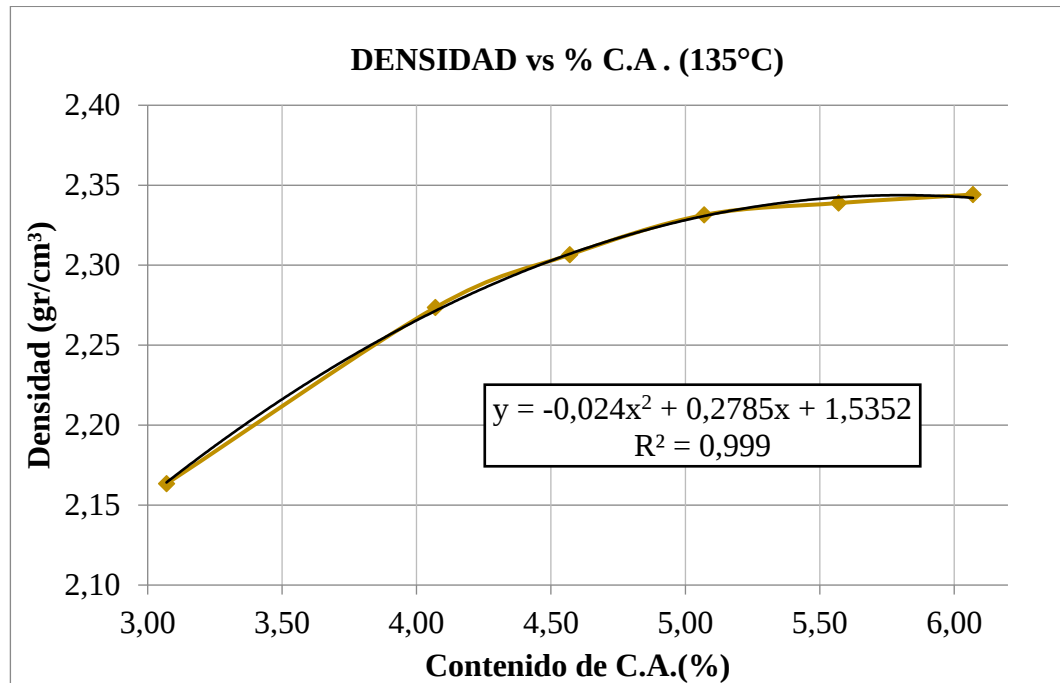
Tabla 3.34 Porcentaje óptimo de asfalto M.A. Fina

Propiedad	Valor máximo según ecuación	% de C.A.	% Óptimo de C.A. a 135°C 3,5-7% VALLE RODAS
Estabilidad Marshall (Lb)	3655,51	5,45	5,38
Densidad (gr/cm³)	2,39	5,57	
% Vacios de la mezcla	3,00	4,90	
R.B.V.	84,69	5,60	
V.A.M.	12,31	5,09	
Fluencia	14,00	5,40	

Fuente: Elaboración propia

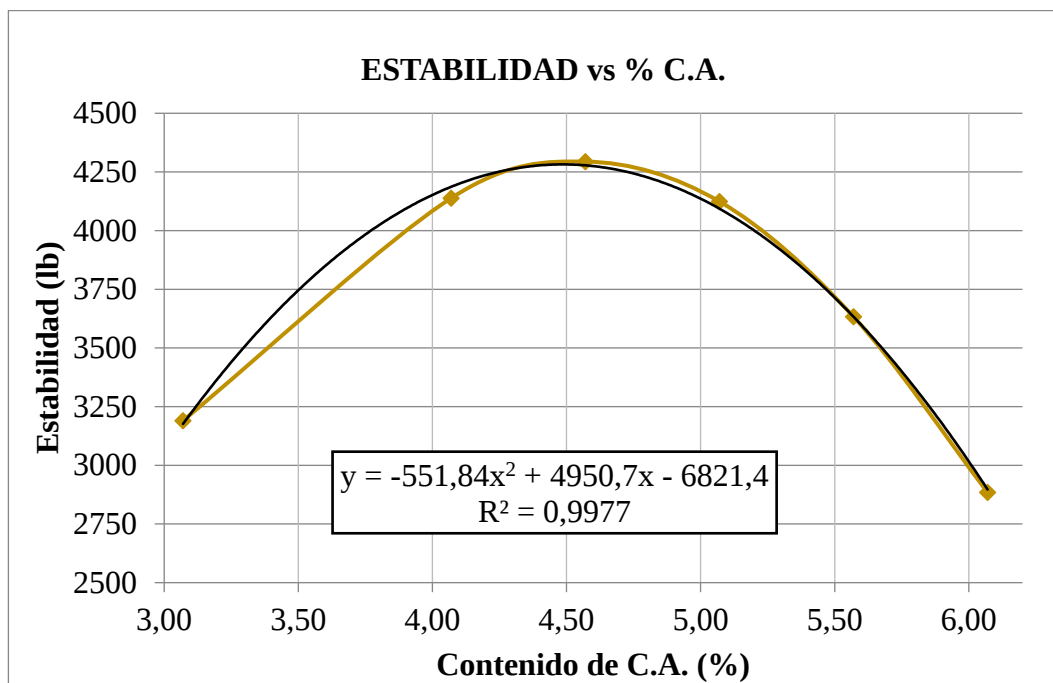
✓ Para mezclas asfálticas abiertas

Figura 3.65 M.A. Abierta: Densidad vs % C.A. (135°C)



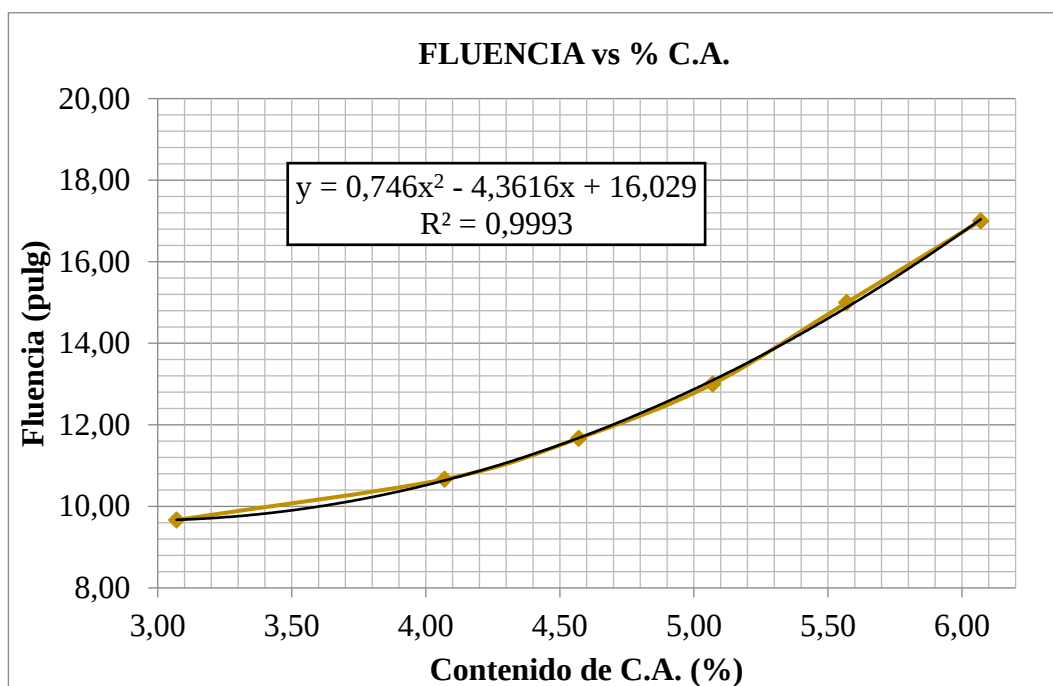
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.66 M.A. Abierta: Estabilidad vs % C.A.



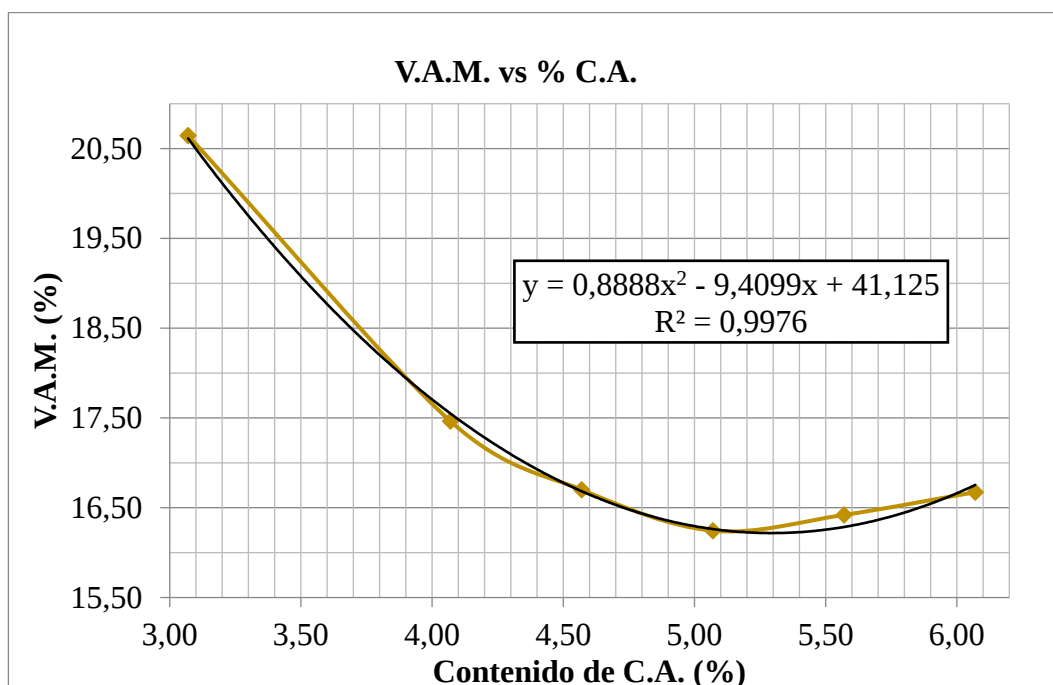
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.67 M.A. Abierta: Fluencia vs % C.A.



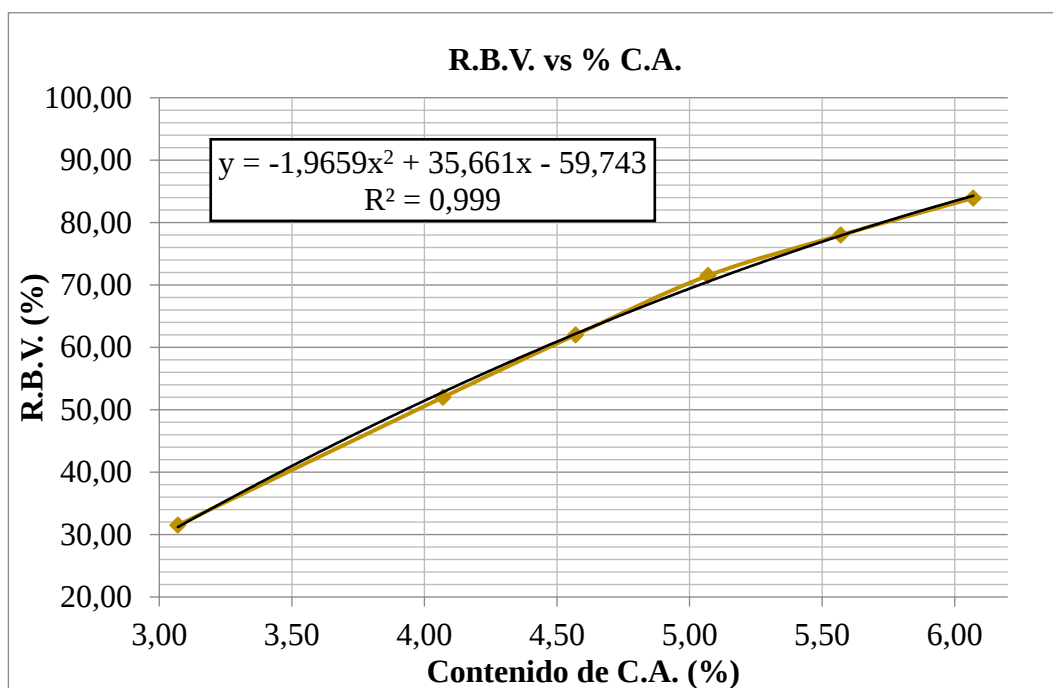
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.68 M.A. Abierta: V.A.M. vs % C.A.



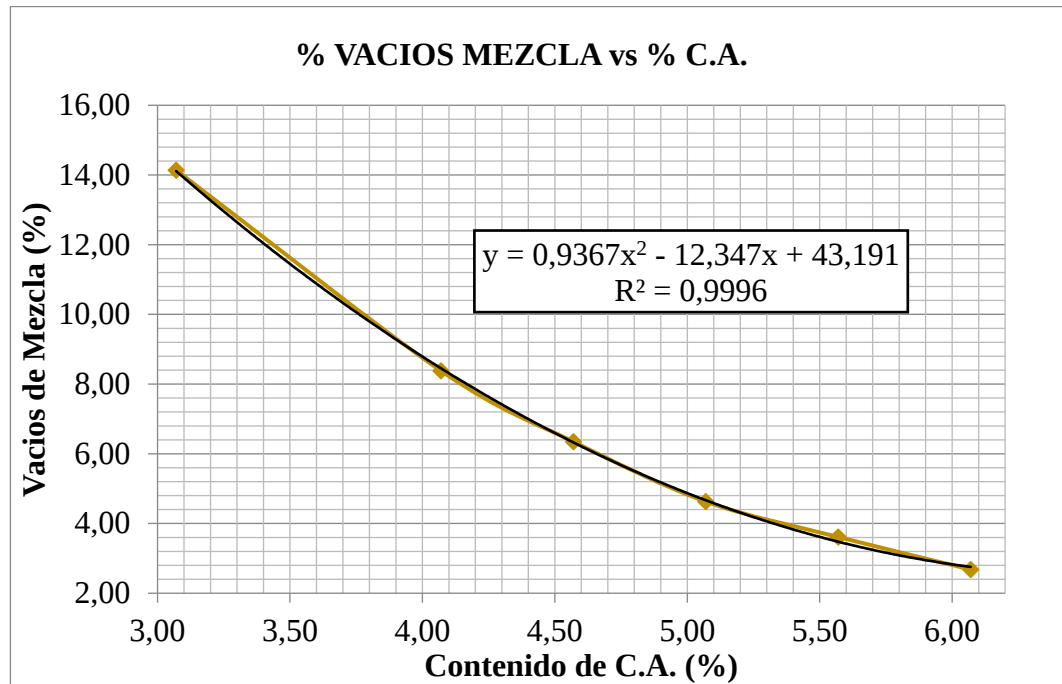
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.69 M.A. Abierta: R.B.V. vs % C.A.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.70 M.A. Abierta: % Vacíos Mezcla vs % C.A.



Fuente: Elaboración propia

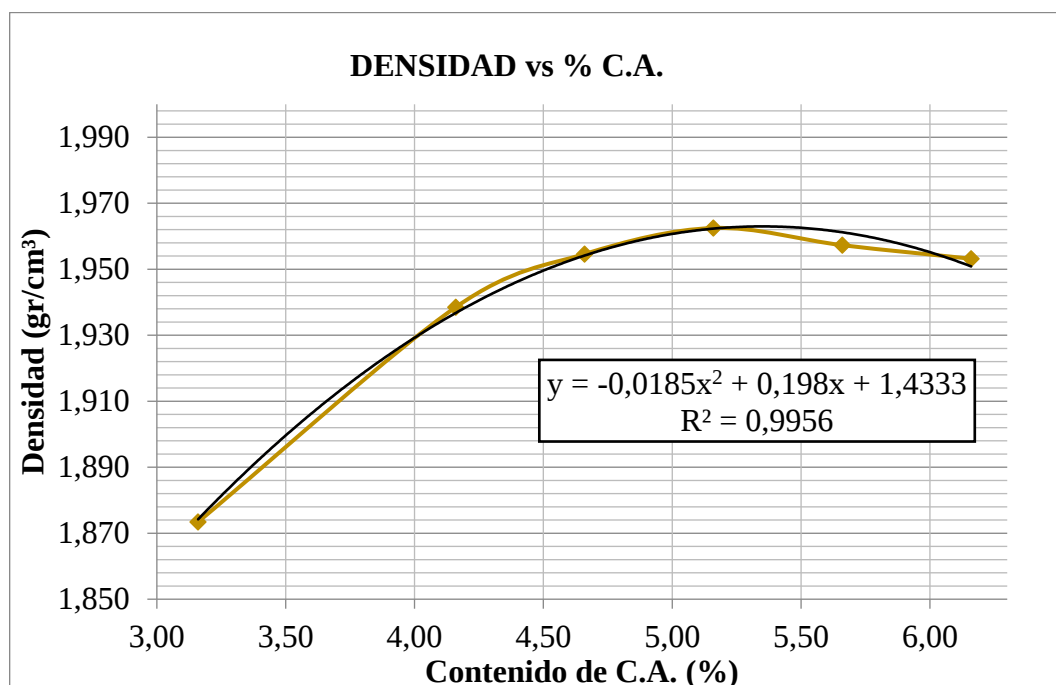
Tabla 3.35 Porcentaje óptimo de asfalto M.A. Abierta

Propiedad	Valor máximo según ecuación	% de C.A.	% Óptimo de C.A. a 135°C 3-6% ASTM T269
Estabilidad Marshall (Lb)	4281,97	4,48	4,83
Densidad (gr/cm ³)	2,34	5,82	
% Vacíos de la mezcla	11,00	3,75	
R.B.V.	74,83	5,27	
V.A.M.	14,17	5,31	
Fluencia	12,00	4,75	

Fuente: Elaboración propia

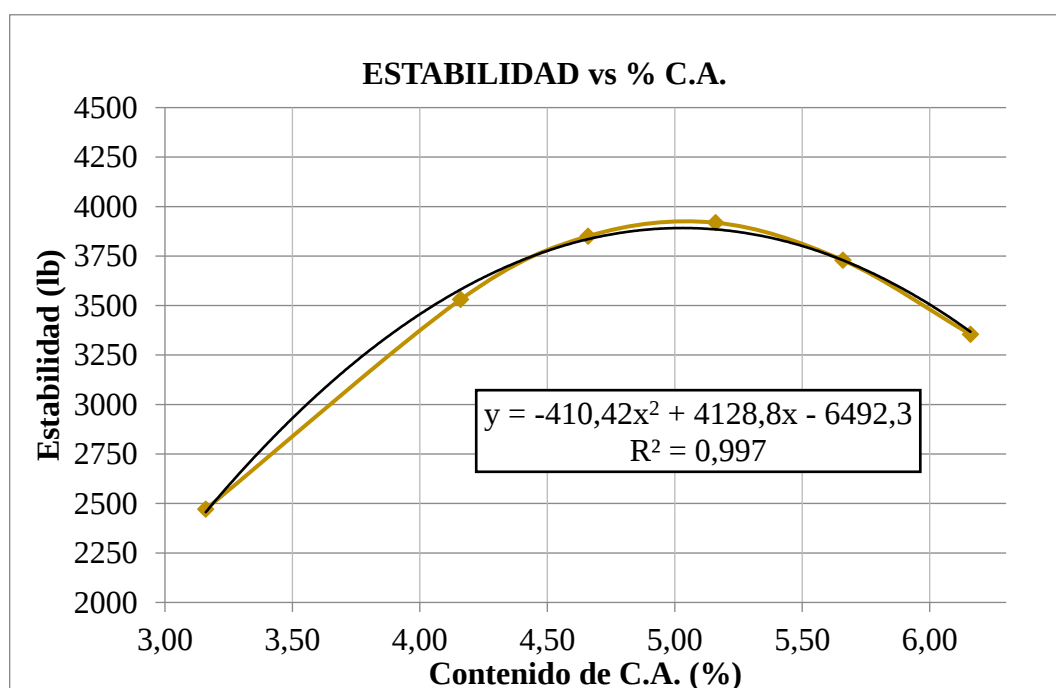
✓ **Para mezclas asfálticas drenantes o porosas**

Figura 3.71 M.A. Drenante o Porosa: Densidad vs % C.A.



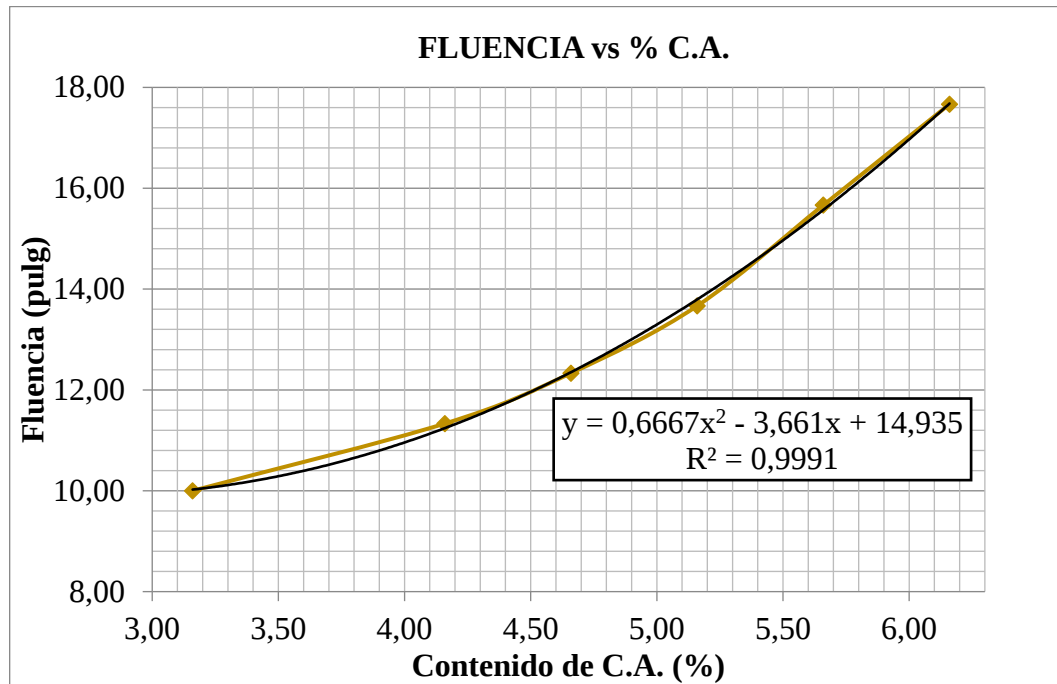
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.72 M.A. Drenante o Porosa: Estabilidad vs % C.A.



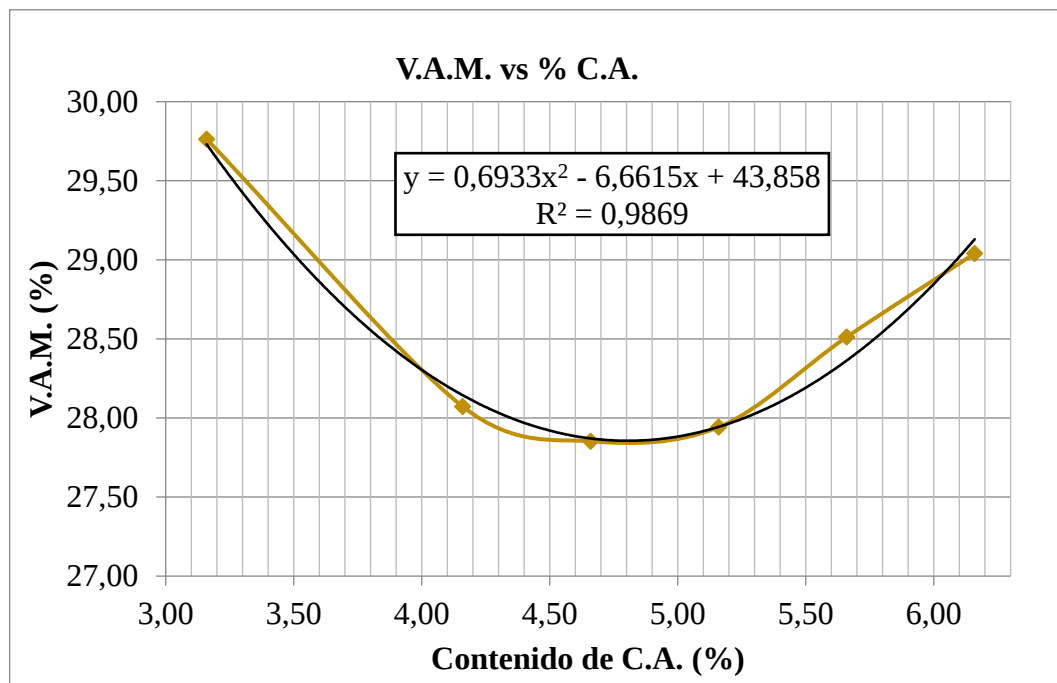
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.73 M.A. Drenante o Porosa: Fluencia vs % C.A.



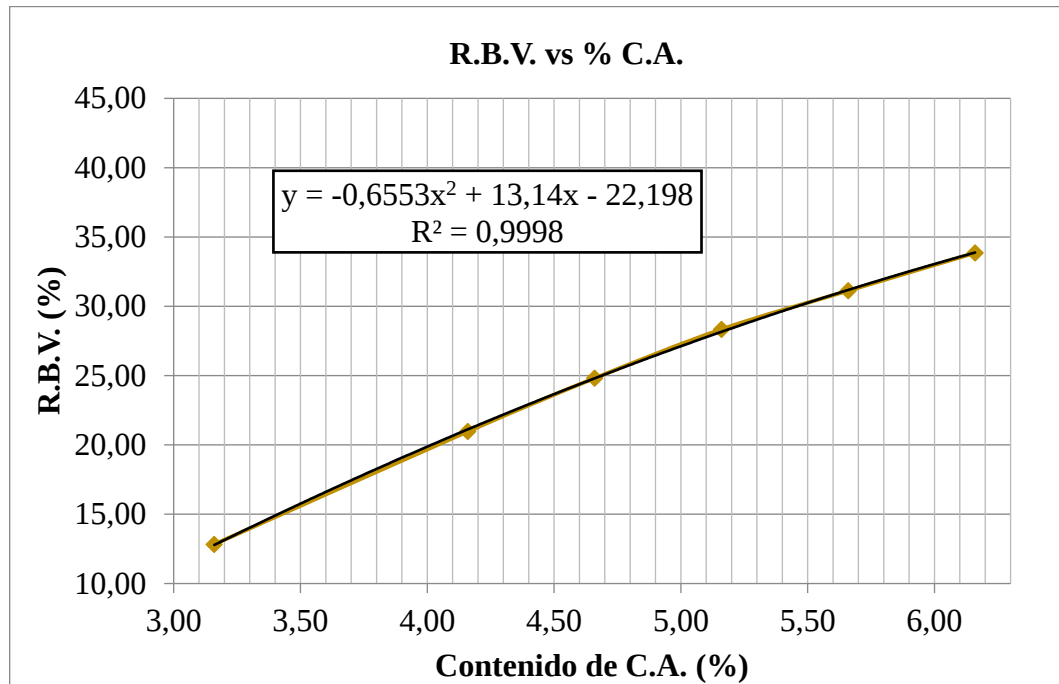
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.74 M.A. Drenante o Porosa: V.A.M. vs % C.A.



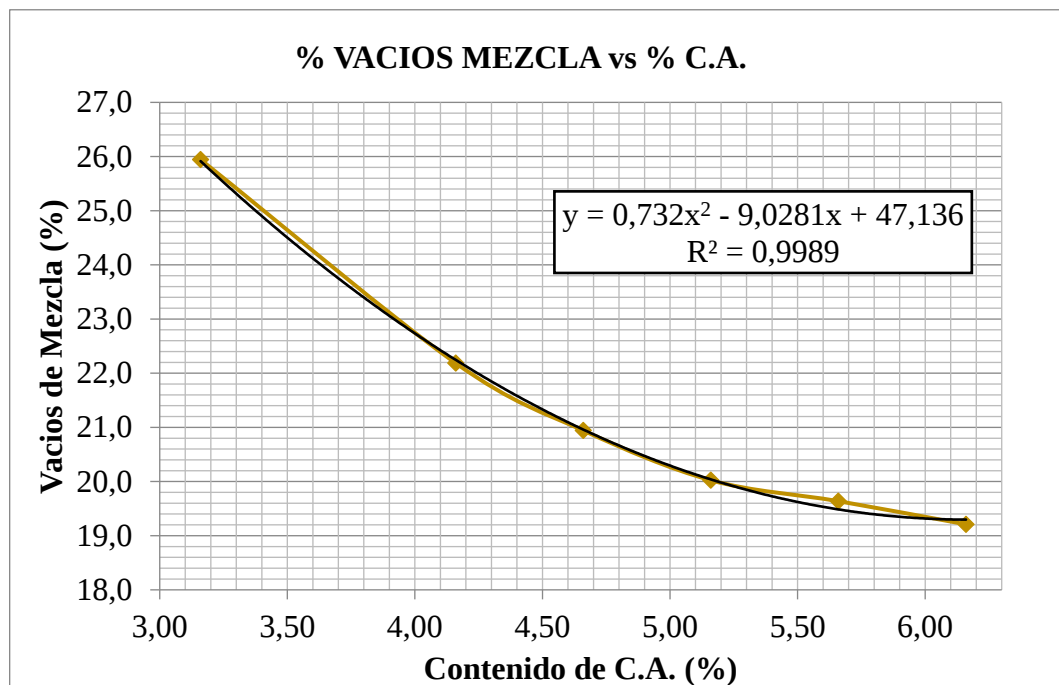
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.75 M.A. Drenante o Porosa: R.B.V. vs % C.A.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.76 M.A. Drenante o Porosa: % Vacíos Mezcla vs % C.A.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.36 Porcentaje óptimo de asfalto M.A. Drenante o Porosa

Propiedad	Valor máximo según ecuación	% de C.A.	% Óptimo de C.A. a 135°C > 4,5 INVIAS 453
Estabilidad Marshall (Lb)	3891,47	5,03	4,82
Densidad (gr/cm ³)	1,96	5,37	
% Vacíos de la mezcla	22,50	4,20	
R.B.V.	25,00	4,67	
V.A.M.	27,71	4,83	
Fluencia	13,00	4,90	

Fuente: Elaboración propia

3.6 Tomografía de probetas

Para la obtención de las imágenes se realizó un escaneo sobre las muestras con un equipo de tomografía axial en la Clínica Panosas.

La tomografía axial es una técnica que proporciona imágenes que permitan determinar las propiedades internas para mezclas asfálticas con un mismo contenido óptimo el cual varía según el tipo de mezcla asfáltica permite conocer su porcentaje de vacíos, contacto entre agregados y su distribución de partículas para distintas briquetas.

En este caso se obtuvo varias imágenes de las cuales por visibilidad y por tener mejor resolución se redujo a 30 imágenes a una altura de 3 centímetros desde la base, para realizar la comparación de los tres tipos de mezclas asfálticas con una convencional que viene a ser la mezcla asfáltica densa.

Figura 3.77 Tomógrafo Clínica Panosas



Fuente: Elaboración propia

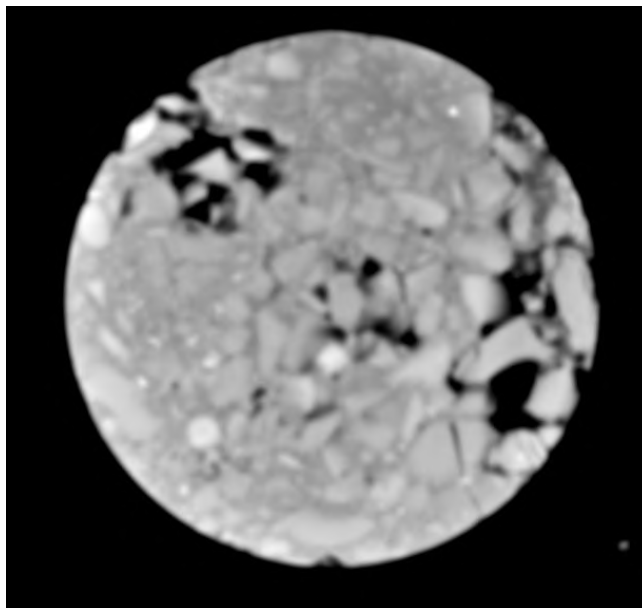
Figura 3.78 Extracción de imágenes mediante tomografía a diferentes alturas



Fuente: Elaboración propia

- ✓ **Tomografía de mezclas asfálticas densas con porcentaje óptimo de asfalto.**

Figura 3.79 Tomografía axial M.A. Densa

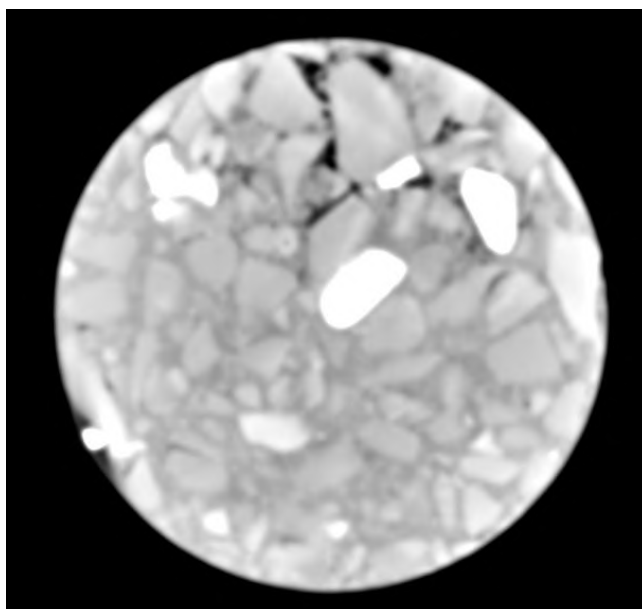


Fuente: Clínica Panosas

Las demás imágenes se verán en el anexo XI.

- ✓ **Tomografía de mezclas asfálticas finas con porcentaje óptimo de asfalto.**

Figura 3.80 Tomografía axial de M.A. Fina

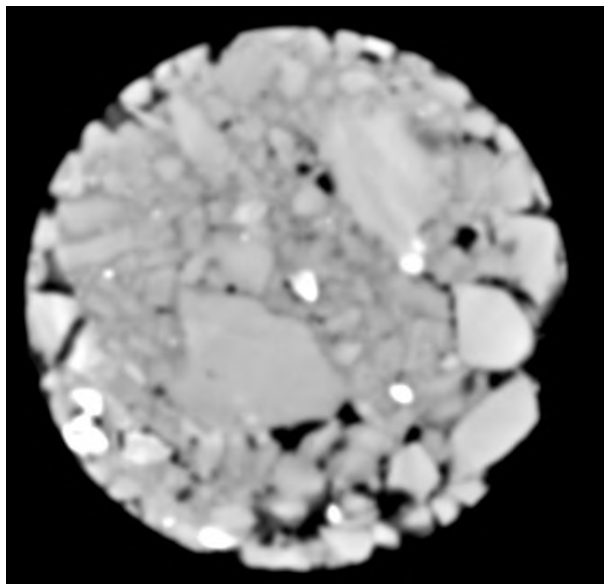


Fuente: Clínica Panosas

Las demás imágenes se verán en el anexo XI.

- ✓ **Tomografía de mezclas asfálticas abiertas con porcentaje óptimo de asfalto.**

Figura 3.81 Tomografía axial M.A. Abierta

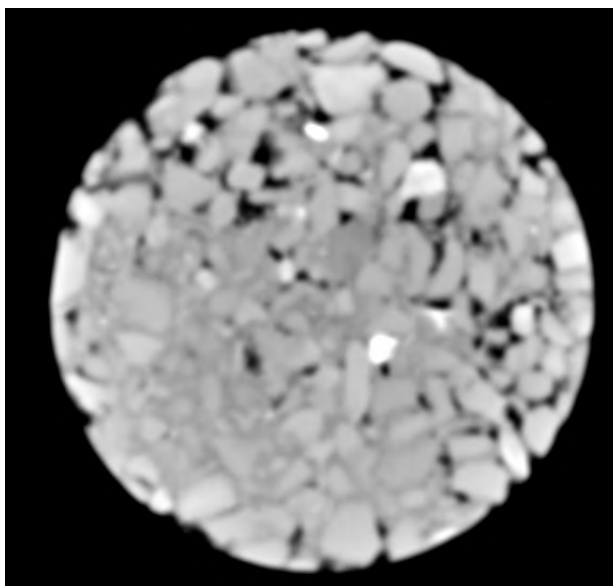


Fuente: Clínica Panosas

Las demás imágenes se verán en el anexo XI.

- ✓ **Tomografía de mezclas asfálticas drenantes o porosas con porcentaje óptimo de asfalto.**

Figura 3.82 Tomografía axial M.A. Drenante



Fuente: Clínica Panosas

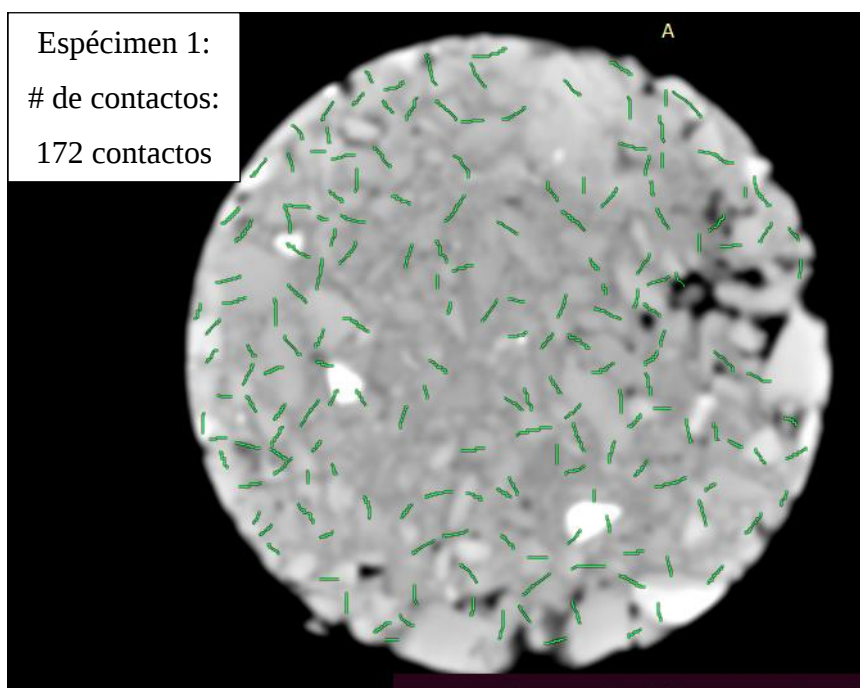
Las demás imágenes se verán en el anexo XI.

3.7 Evaluación de imágenes

✓ Contacto agregado-agregado

Se realizará el conteo sobre el contacto que existe entre agregados de manera visual y con un programa exclusivo para tomografías axiales. Como el procedimiento es similar para los 4 tipos de mezclas asfálticas se realizará el contacto entre agregados para cada imagen estudiada para esto se utilizará el programa mDicom en el cual se puede visibilizar las imágenes y donde se puede ver claramente en cada imagen si existe o no el contacto entre agregado-agregado al finalizar se contará cuantos contactos existen para cada tipo de mezcla asfáltica y se realizara una comparación sobre la variación. Las imágenes de respaldo de los resultados obtenidos se encuentran en el ANEXO XII.

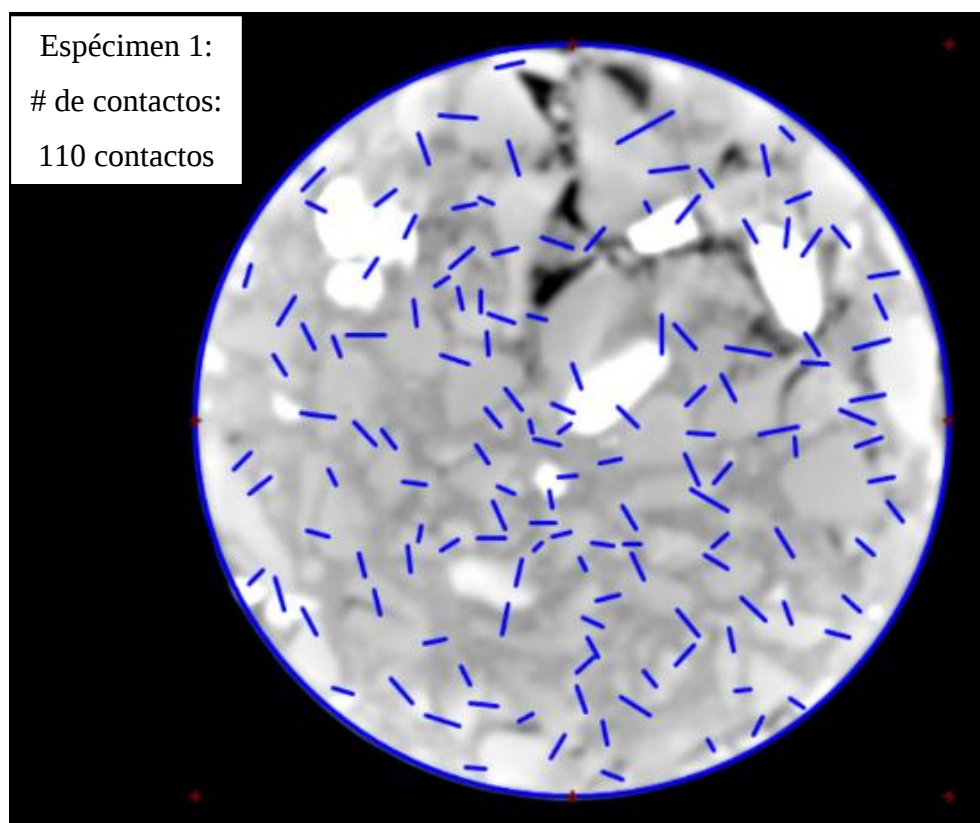
Figura 3.83 Contacto agregado – agregado para una mezcla asfáltica densa



Fuente: Elaboración propia

Como se demuestra en la **figura 3.83** con el programa mDicom de manera manual se realizó el conteo de contacto agregado - agregado para el espécimen 1, entre partículas para una mezcla asfáltica densa dando un total de 172 contactos como se demuestra en la imagen.

Figura 3.84 Contacto agregado – agregado para una mezcla asfáltica fina



Fuente: Elaboración propia

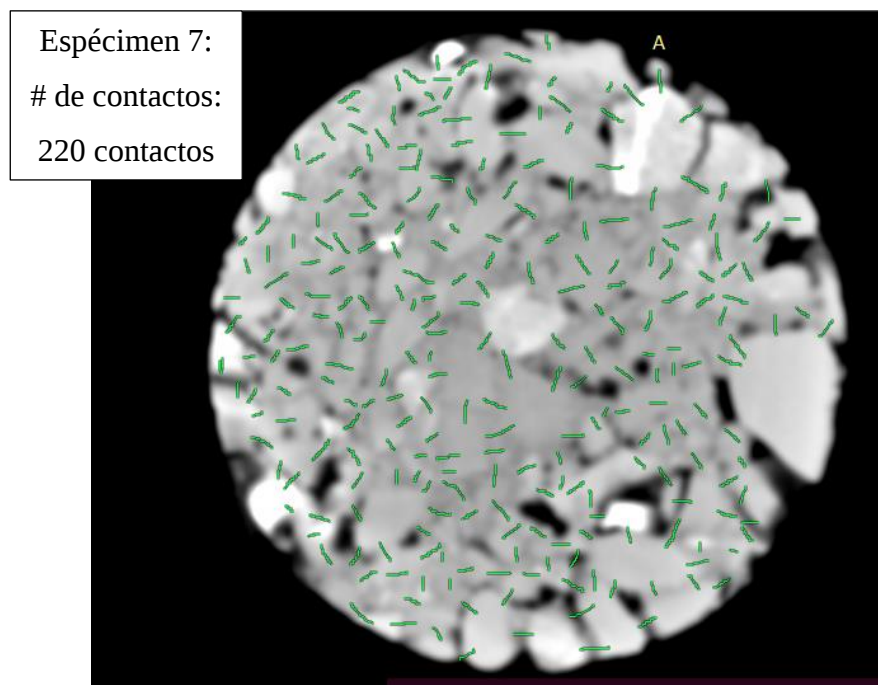
En la **figura 3.84** con el programa mDicom de manera manual se realizó el conteo de contacto agregado - agregado para el espécimen 1, entre partículas para una mezcla asfáltica fina dando un total de 110 contactos como se demuestra en la imagen.

En la **figura 3.85** con el programa mDicom de manera manual se realizó el conteo de contacto agregado - agregado para el espécimen 7, entre partículas para una mezcla asfáltica abierta dando un total de 220 contactos como se demuestra en la imagen a estudiar.

En la **figura 3.86** con el programa mDicom de manera manual se realizó el conteo de contacto agregado - agregado para el espécimen 7, entre partículas para una mezcla asfáltica drenante dando un total de 297 contactos como se demuestra en la imagen a estudiar.

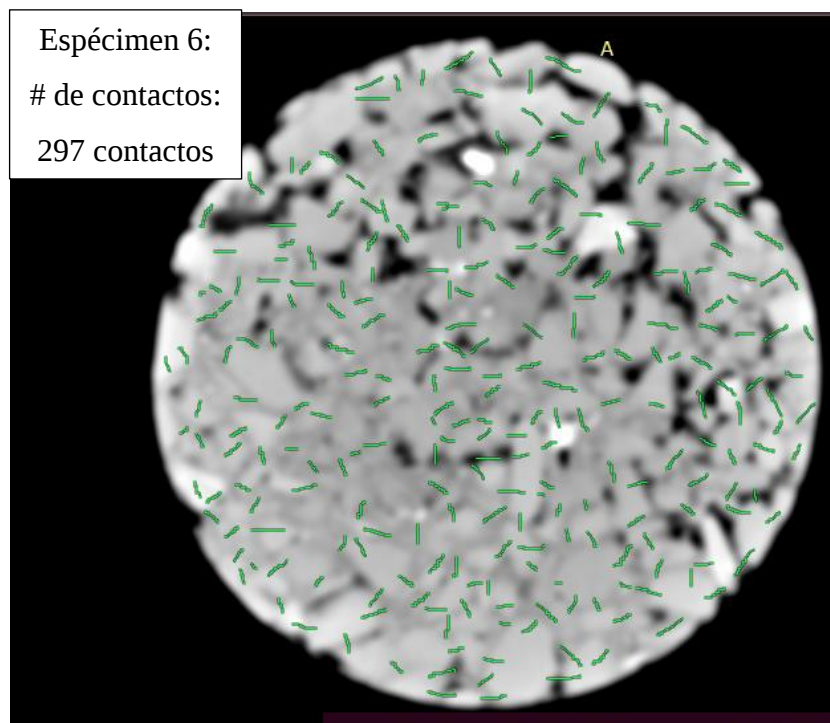
Como resumen del estudio sobre el número de contactos para cada imagen de cada espécimen se cuenta con la **tabla 3.37**, **tabla 3.38**, **tabla 3.39** y la **tabla 3.40** con un respaldo de ello revisar ANEXO XII.

Figura 3.85 Contacto agregado – agregado para una mezcla asfáltica abierta



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.86 Contacto agregado – agregado para una mezcla asfáltica drenante



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.37 Resumen número de contactos para M.A. Densas

Mezcla asfáltica densa	
ESPÉCIMEN	# de contacto A-A
1	175
2	176
3	169
4	165
5	167
6	171
7	177
8	182
9	180
10	183
11	181
12	177
13	174
14	178
15	181
16	168
17	170
18	169
19	167
20	172
21	170
22	168
23	169
24	167
25	184
26	175
27	169
28	169
29	167
30	179
Media =	173,30
Desviación =	5,72
Mínimo =	165,00
Máximo =	184,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.38 Resumen número de contactos para M.A. Finas

Mezcla asfáltica fina	
ESPÉCIMEN	# de contacto A-A
1	110
2	117
3	111
4	111
5	109
6	112
7	122
8	115
9	123
10	119
11	113
12	117
13	114
14	119
15	117
16	122
17	123
18	119
19	118
20	113
21	111
22	128
23	124
24	127
25	113
26	114
27	119
28	111
29	119
30	123
Media =	117,10
Desviación =	5,25
Mínimo =	109,00
Máximo =	128,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.39 Resumen número de contactos para M.A. Abiertas

Mezcla asfáltica abierta	
ESPÉCIMEN	# de contacto A-A
1	220
2	217
3	211
4	215
5	216
6	218
7	220
8	215
9	219
10	216
11	223
12	226
13	220
14	218
15	217
16	211
17	211
18	217
19	215
20	220
21	213
22	217
23	221
24	224
25	212
26	216
27	219
28	221
29	227
30	213
Media =	217,60
Desviación =	4,21
Mínimo =	211,00
Máximo =	227,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.40 Resumen número de contactos para M.A. Drenantes

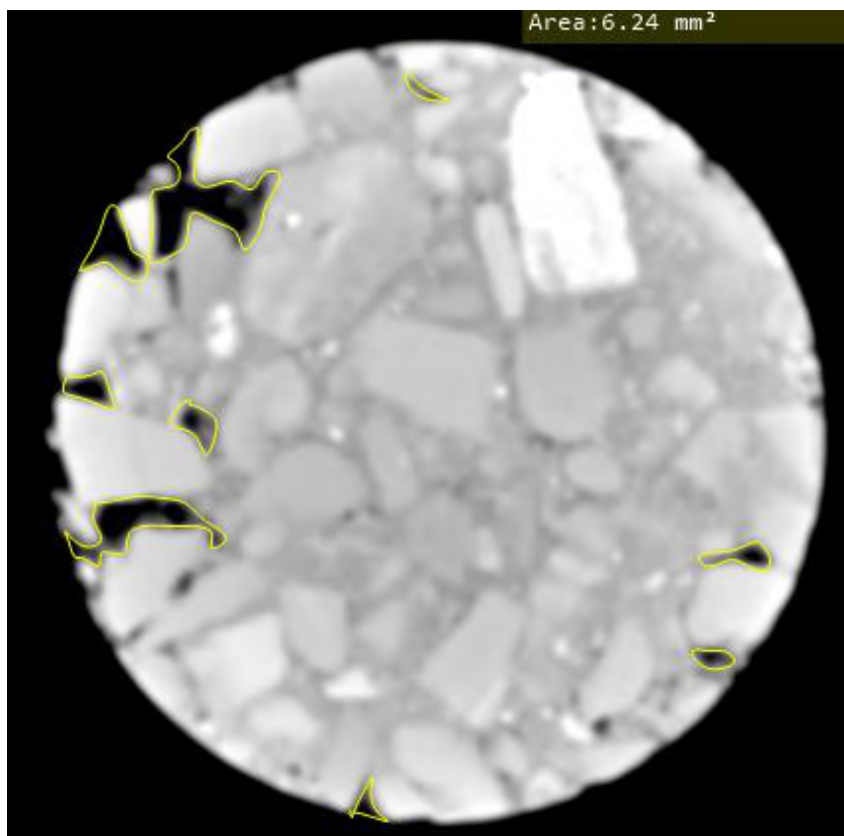
Mezcla asfáltica drenante o porosa	
ESPÉCIMEN	# de contacto A-A
1	280
2	281
3	294
4	293
5	293
6	297
7	281
8	293
9	284
10	293
11	283
12	292
13	287
14	281
15	290
16	282
17	280
18	290
19	298
20	294
21	289
22	291
23	289
24	287
25	287
26	276
27	289
28	297
29	278
30	281
Media =	287,67
Desviación =	6,20
Mínimo =	276,00
Máximo =	298,00

Fuente: Elaboración propia

✓ **Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica**

Para la medición de los porcentajes de vacíos en las mezclas asfálticas estudiadas se utilizará el programa mDicom donde se medirá todos los vacíos que están de color negro dentro de la imagen al terminar de medir todos estos vacíos se sumarán y estos se procederán a dividir sobre el área total de la imagen de esta manera se logrará obtener el porcentaje de vacíos de cada imagen para cada tipo de mezcla asfáltica la cual se comparará con el obtenido en laboratorio. Las imágenes de respaldo de los resultados obtenidos se encuentran en el ANEXO XII.

Figura 3.87 Medición del área de vacíos en las tomografías axiales

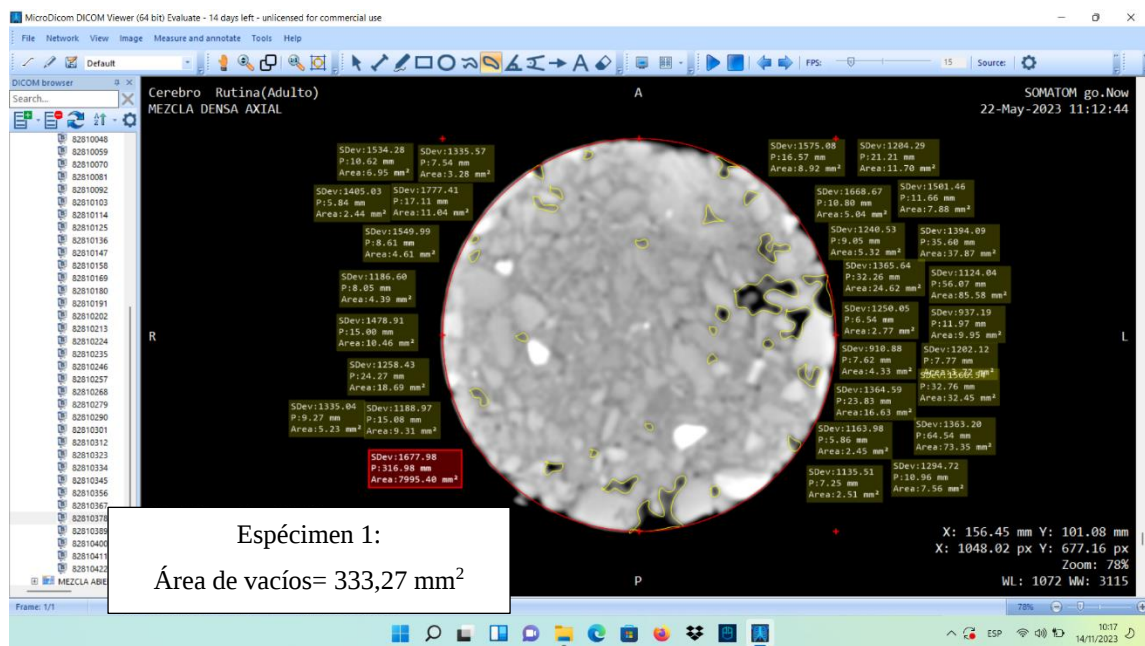


Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la **figura 3.87** todos los vacíos son los que se encuentran en color negro dentro de las imágenes de tomografía, para esto primeramente se debe medir todas las áreas totales de cada imagen para los 30 especímenes (imágenes de cada mezcla asfáltica en total 30 datos por cada mezcla en estudio).

Para la **figura 3.88** nuevamente se utilizó el programa mDicom para medir de manera manual los espacios vacíos que vienen a ser todo lo que se encuentra dentro de la imagen de tomografía en color negro, donde al final se suman todas las áreas parciales medidas dando un área total de vacíos para una mezcla asfáltica densa, para el espécimen 1 de 333,27 mm² el cual se lleva a una tabla de Excel donde ya se encuentran el área total para cada espécimen y se procede a encontrar el porcentaje de vacíos como se detalla en la **tabla 3.41** para las 30 imágenes obtenidas para una mezcla asfáltica densa.

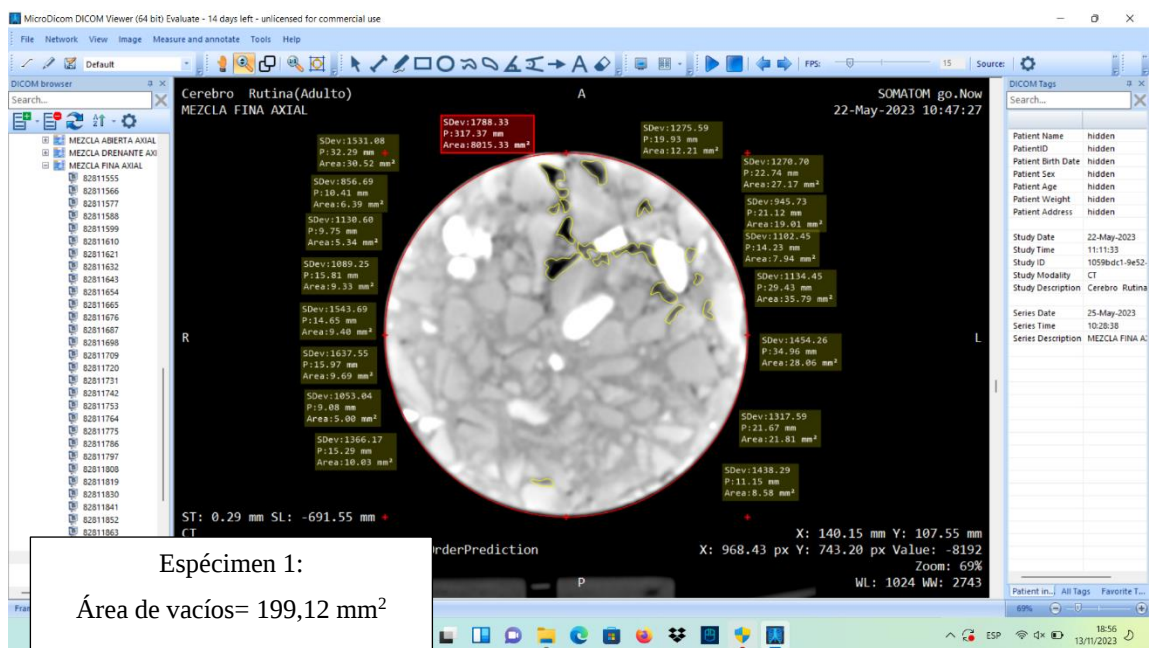
Figura 3.88 Cálculo de las áreas de vacíos en T.C. de M.A. Densa



Fuente: Elaboración propia

Para la **figura 3.89** nuevamente se utilizó el programa mDicom para medir de manera manual los espacios vacíos que vienen a ser todo lo que se encuentra dentro de la imagen de tomografía en color negro, donde al final se suman todas las áreas parciales medidas dando un área total de vacíos para una mezcla asfáltica densa, para el espécimen 1 de 199,12 mm² el cual se lleva a una tabla de Excel donde ya se encuentran el área total para cada espécimen y se procede a encontrar el porcentaje de vacíos como se detalla en la **tabla 3.42** para las 30 imágenes obtenidas para una mezcla asfáltica fina.

Figura 3.89 Cálculo de las áreas de vacíos en T.C. de M.A. Fina

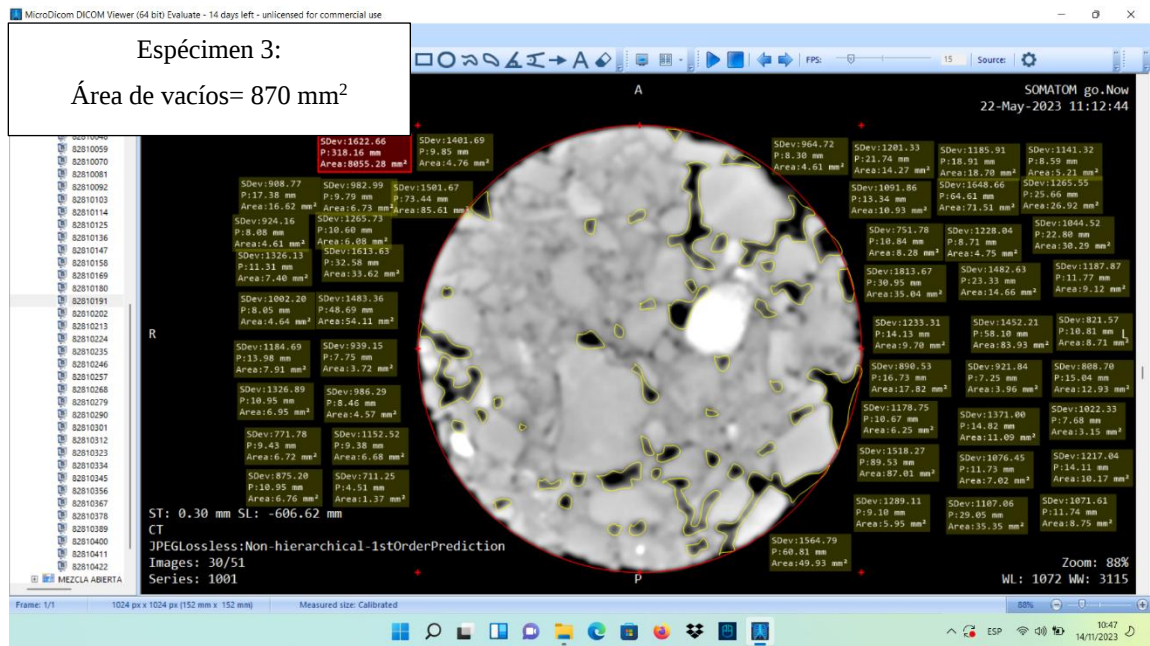


Fuente: Elaboración propia

Para la **figura 3.90** nuevamente se utilizó el programa mDicom para medir de manera manual los espacios vacíos que vienen a ser todo lo que se encuentra dentro de la imagen de tomografía en color negro, donde al final se suman todas las áreas parciales medidas dando un área total de vacíos para una mezcla asfáltica densa, para el espécimen 1 de 870mm² el cual se lleva a una tabla de Excel donde ya se encuentran el área total para cada espécimen y se procede a encontrar el porcentaje de vacíos como se detalla en la **tabla 3.43** para las 30 imágenes obtenidas para una mezcla asfáltica abierta.

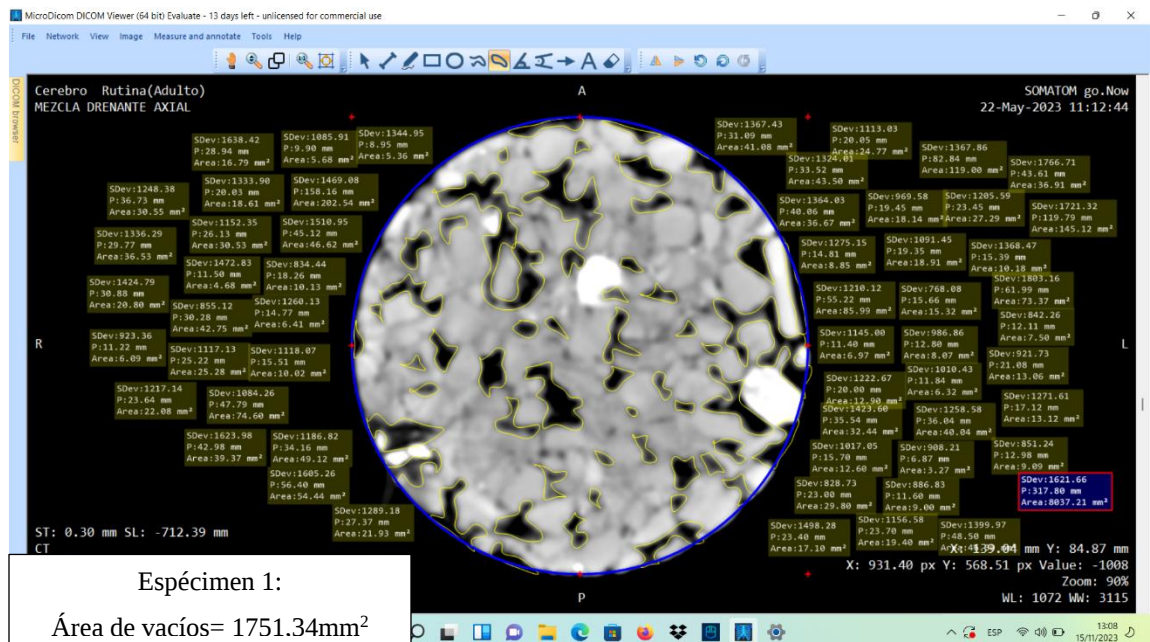
Para la **figura 3.91** nuevamente se utilizó el programa mDicom para medir de manera manual los espacios vacíos que vienen a ser todo lo que se encuentra dentro de la imagen de tomografía en color negro, donde al final se suman todas las áreas parciales medidas dando un área total de vacíos para una mezcla asfáltica densa, para el espécimen 1 de 1751,34 mm² el cual se lleva a una tabla de Excel donde ya se encuentran el área total para cada espécimen y se procede a encontrar el porcentaje de vacíos como se detalla en la **tabla 3.44** para las 30 imágenes obtenidas para una mezcla asfáltica drenante.

Figura 3.90 Cálculo de las áreas de vacíos en T.C. de M.A. Abierta



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.91 Cálculo de las áreas de vacíos en T.C. de M.A. Drenante



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.41 Porcentaje de vacíos para una M.A. Densa

Mezcla asfáltica densa por mDicom			
ESPÉCIMEN	ÁREA VACÍOS (mm²)	ÁREA TOTAL (mm²)	% VACÍOS
1	333,27	7995,40	4,17%
2	340,68	8016,34	4,25%
3	330,32	8055,27	4,10%
4	340,11	8055,00	4,22%
5	341,28	8055,00	4,24%
6	340,35	8084,60	4,21%
7	330,67	8014,03	4,13%
8	358,77	8127,78	4,41%
9	350,55	8127,79	4,31%
10	355,81	8127,80	4,38%
11	353,74	8127,79	4,35%
12	361,92	8156,92	4,44%
13	348,56	7997,98	4,36%
14	330,77	8037,21	4,12%
15	351,68	7945,80	4,43%
16	349,89	7997,99	4,37%
17	347,35	7997,98	4,34%
18	360,75	8037,19	4,49%
19	341,43	7997,98	4,27%
20	338,80	8037,13	4,22%
21	337,55	8011,03	4,21%
22	350,11	8024,08	4,36%
23	353,68	8063,32	4,39%
24	343,77	8050,25	4,27%
25	341,63	7997,99	4,27%
26	355,87	8129,05	4,38%
27	340,56	7997,99	4,26%
28	358,02	8037,00	4,45%
29	350,45	7986,81	4,39%
30	353,87	8047,81	4,40%
Media =			4,31%
Desviación =			0,11%
Mínimo =			4,10%
Máximo =			4,49%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.42 Porcentaje de vacíos para una M.A. Fina

Mezcla asfáltica fina por mDicom			
ESPÉCIMEN	ÁREA VACÍOS (mm²)	ÁREA TOTAL (mm²)	% VACÍOS
1	199,12	8015,33	2,48%
2	187,05	8056,59	2,32%
3	216,69	8015,35	2,70%
4	188,21	8098,63	2,32%
5	186,76	8064,61	2,32%
6	204,62	8016,48	2,55%
7	206,31	8064,81	2,56%
8	188,34	8015,67	2,35%
9	188,56	7984,21	2,36%
10	184,31	8005,10	2,30%
11	187,24	7980,20	2,35%
12	188,91	7984,21	2,37%
13	191,53	8004,20	2,39%
14	187,45	8005,60	2,34%
15	192,21	8000,45	2,40%
16	185,45	8016,48	2,31%
17	191,77	8015,33	2,39%
18	195,26	8098,63	2,41%
19	199,94	8015,33	2,49%
20	203,21	8015,00	2,54%
21	210,38	8015,80	2,62%
22	212,56	8010,50	2,65%
23	222,61	8050,47	2,77%
24	225,31	8056,59	2,80%
25	198,65	8056,00	2,47%
26	201,11	8056,60	2,50%
27	194,32	8056,00	2,41%
28	187,56	8056,80	2,33%
29	200,46	8041,87	2,49%
30	189,29	8040,00	2,35%
Media =			2,46%
Desviación =			0,14%
Mínimo =			2,30%
Máximo =			2,80%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.43 Porcentaje de vacíos para una M.A. Abierta

Mezcla asfáltica abierta por RadiAnt DICOM			
ESPÉCIMEN	ÁREA VACÍOS (mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% VACÍOS
1	875,71	8173,78	10,71%
2	877,00	8152,92	10,76%
3	862,70	8053,28	10,71%
4	838,90	8051,61	10,42%
5	884,01	8127,79	10,88%
6	824,46	8030,48	10,27%
7	806,21	8030,00	10,04%
8	825,65	8050,00	10,26%
9	845,53	8045,60	10,51%
10	826,03	8066,47	10,24%
11	866,65	8066,00	10,74%
12	866,95	8080,00	10,73%
13	809,03	8045,33	10,06%
14	847,87	7985,54	10,62%
15	866,67	8087,31	10,72%
16	877,62	8087,00	10,85%
17	863,51	8030,47	10,75%
18	852,75	8030,48	10,62%
19	818,60	8030,40	10,19%
20	894,39	8055,28	11,10%
21	888,05	7997,99	11,10%
22	799,27	7997,90	9,99%
23	848,03	8050,00	10,53%
24	876,04	8050,30	10,88%
25	865,90	8050,00	10,76%
26	868,14	7997,00	10,86%
27	847,91	8030,48	10,56%
28	873,13	8030,00	10,87%
29	893,38	8045,00	11,10%
30	875,74	7998,00	10,95%
Media =			10,63%
Desviación =			0,32%
Mínimo =			9,99%
Máximo =			11,10%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.44 Porcentaje de vacíos para una M.A. Drenante

Mezcla asfáltica drenante o porosa por RadiAnt DICOM			
ESPÉCIMEN	ÁREA VACÍOS (mm²)	ÁREA TOTAL (mm²)	% VACÍOS
1	1743,34	8037,21	21,69%
2	1749,84	7997,99	21,88%
3	1738,13	8024,09	21,66%
4	1733,91	7997,99	21,68%
5	1746,26	7997,98	21,83%
6	1716,77	7997,99	21,47%
7	1730,77	8050,17	21,50%
8	1725,86	8129,06	21,23%
9	1742,53	8063,42	21,61%
10	1729,12	7997,99	21,62%
11	1711,55	8037,21	21,30%
12	1708,85	7997,98	21,37%
13	1684,14	7997,99	21,06%
14	1742,88	7997,98	21,79%
15	1778,87	7997,00	22,24%
16	1785,72	8000,54	22,32%
17	1747,31	8015,60	21,80%
18	1733,23	7998,00	21,67%
19	1730,72	7997,89	21,64%
20	1741,16	7997,99	21,77%
21	1715,10	7997,99	21,44%
22	1716,40	8037,13	21,36%
23	1717,80	8024,08	21,41%
24	1752,94	8050,31	21,77%
25	1720,50	8102,79	21,23%
26	1721,91	8129,10	21,18%
27	1772,13	7997,98	22,16%
28	1685,49	8037,19	20,97%
29	1787,71	8050,26	22,21%
30	1748,88	7997,98	21,87%
Media =			21,62%
Desviación =			0,34%
Mínimo =			20,97%
Máximo =			22,32%

Fuente: Elaboración propia

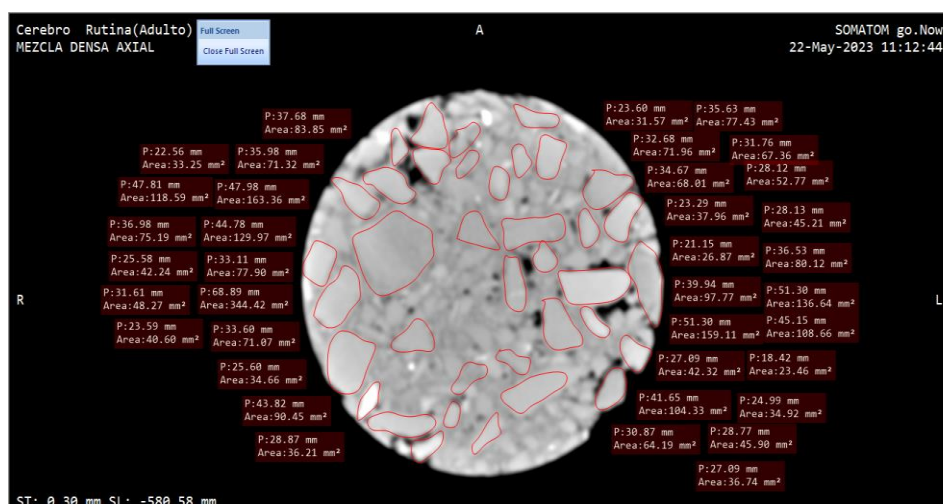
3.8 Caracterización de tamaño

Para la realización de la caracterización, se medirá el área de los agregados de $1\frac{1}{2}''$ a $1''$, de $1''$ a $\frac{3}{4}''$ y de $\frac{3}{4}''$ a $\frac{1}{2}''$, para las mezclas asfálticas densas, finas y abiertas y para las drenantes se procederá a medir los agregados de $\frac{1}{2}''$ a $\frac{3}{8}''$ y de $\frac{3}{8}''$ a $\frac{1}{4}''$ se sumará las áreas de los agregados del mismo tamaño el cual se procederá a dividir entre el área total de la imagen estudiada donde el valor encontrado como resultado en porcentaje debe ser similar al del diseño granulométrico retenido para ese tamaño. Este resultado puede variar o ser similar ya que en la medición manual siempre intervienen varios factores de error de medición. Este procedimiento se realizará de la misma manera para cada imagen de las distintas mezclas asfálticas en estudio.

Al finalizar estos resultados de los cinco tamaños encontrados se compararán con la curva de granulometría con la representación de las bandas de limitación dada y se conocerá como están cayendo las curvas de lo medido respecto a los puntos del original obtenido en laboratorio y con esto se conocerá el grado de certidumbre que existe entre lo medido y lo obtenido en laboratorio. Para esto se tiene 4 tablas resúmenes para las mezclas asfálticas en estudio la **tabla 3.46**, **tabla 3.47**, **tabla 3.48**, **tabla 3.50**, **tabla 3.51**, **tabla 3.52**, **tabla 3.54**, **tabla 3.55**, **tabla 3.56**, **tabla 3.58** y la **tabla 3.59** más sus imágenes de respaldo sobre los resultados obtenidos que se encuentran en el ANEXO XIII.

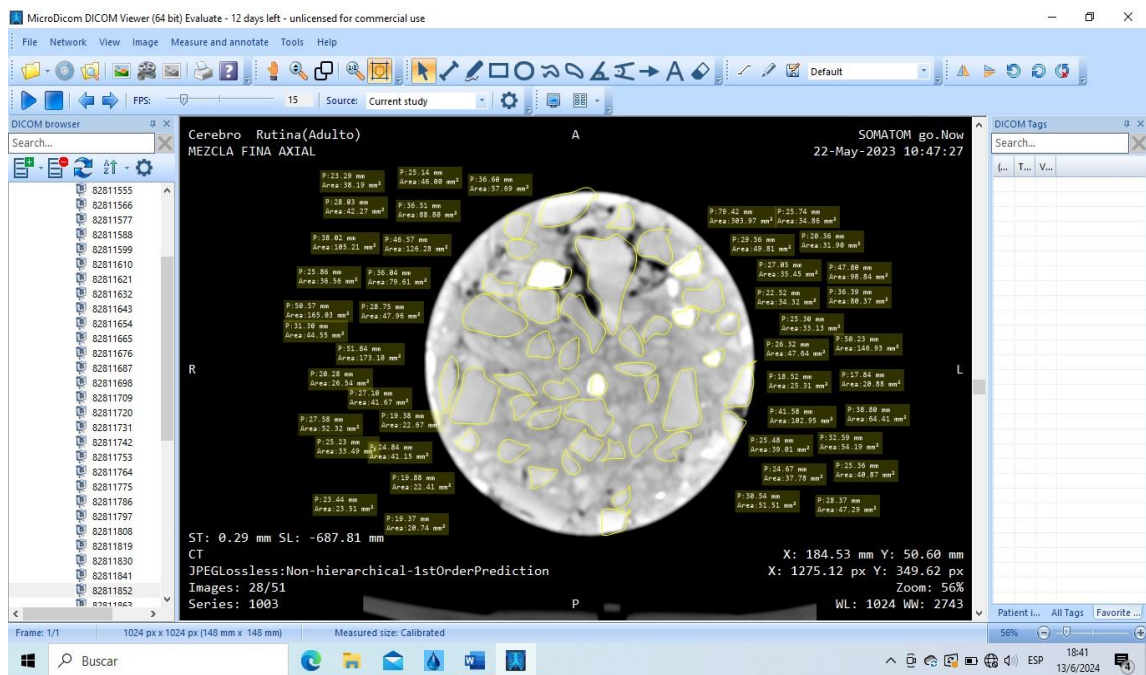
- ✓ Porcentaje de retenido según el tamaño de partícula obtenido mediante la medición a las tomografías axiales para mezclas asfálticas densas.

Figura 3.92 Caracterización para una M.A. Densa



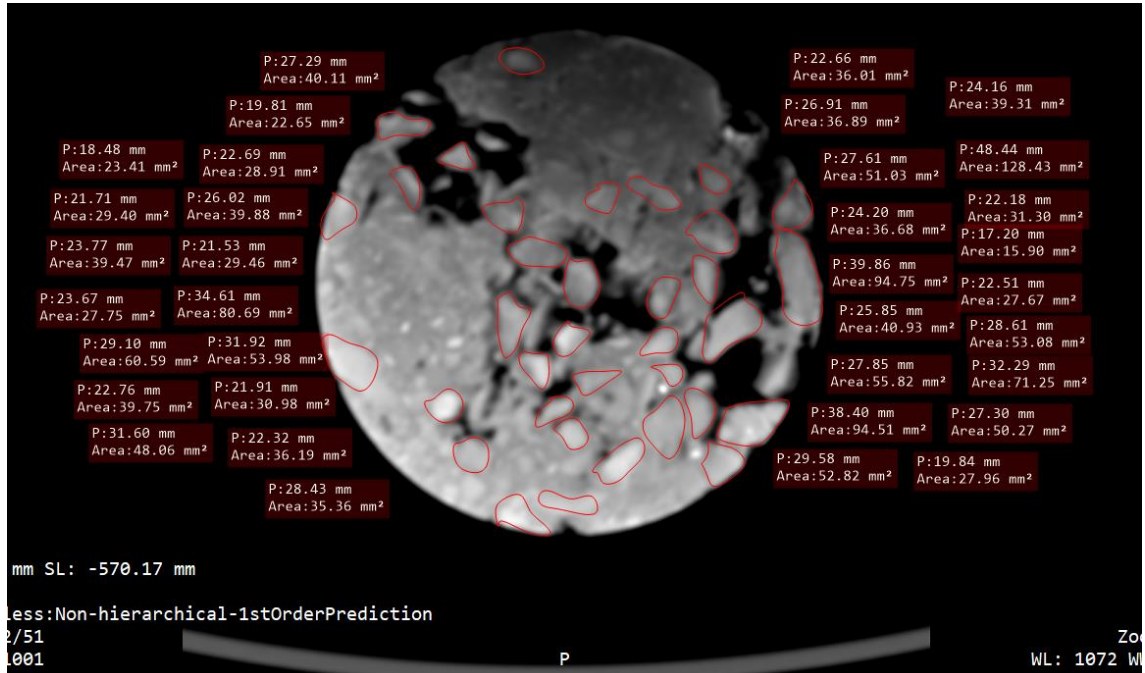
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.93 Caracterización para una M.A. Fina



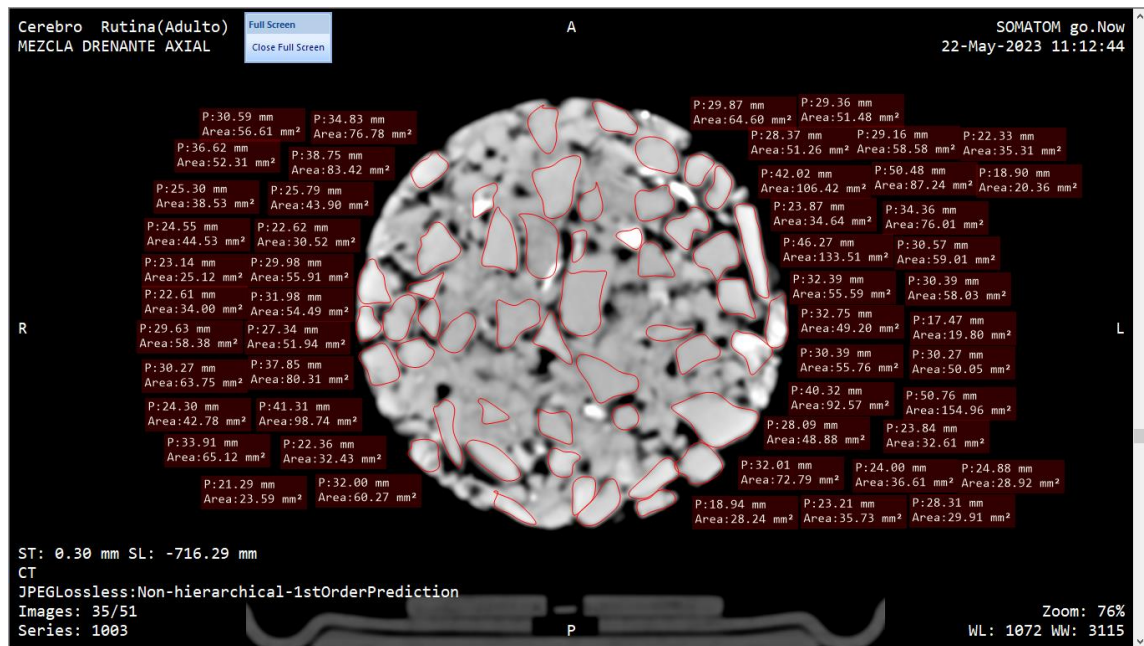
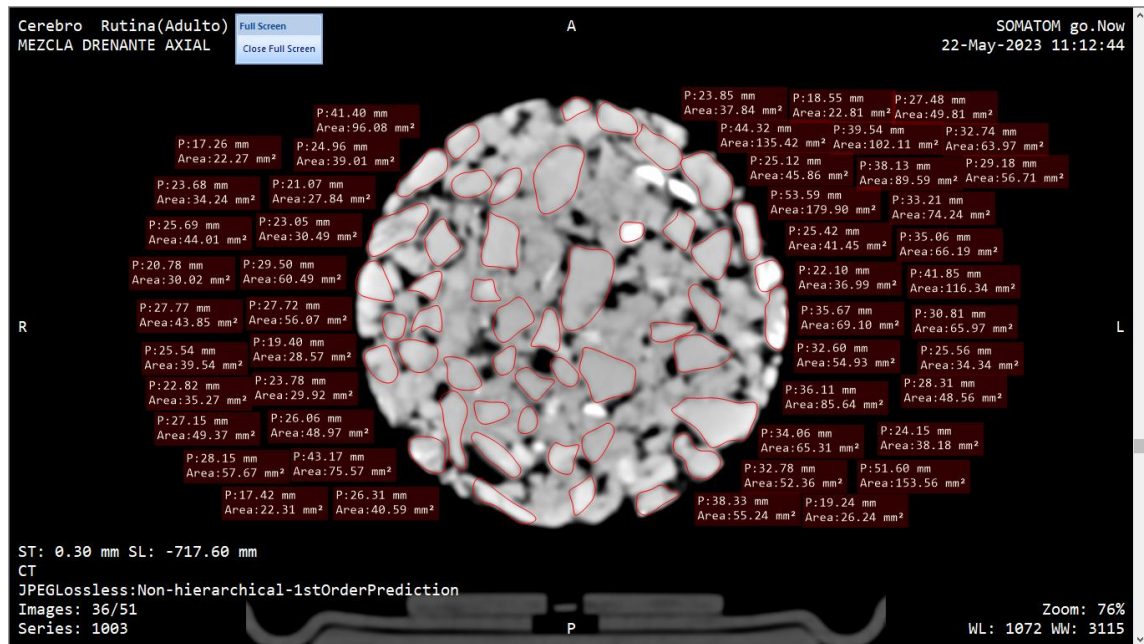
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.94 Caracterización para una M.A. Abierta



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.95 Caracterización para una M.A. Drenante



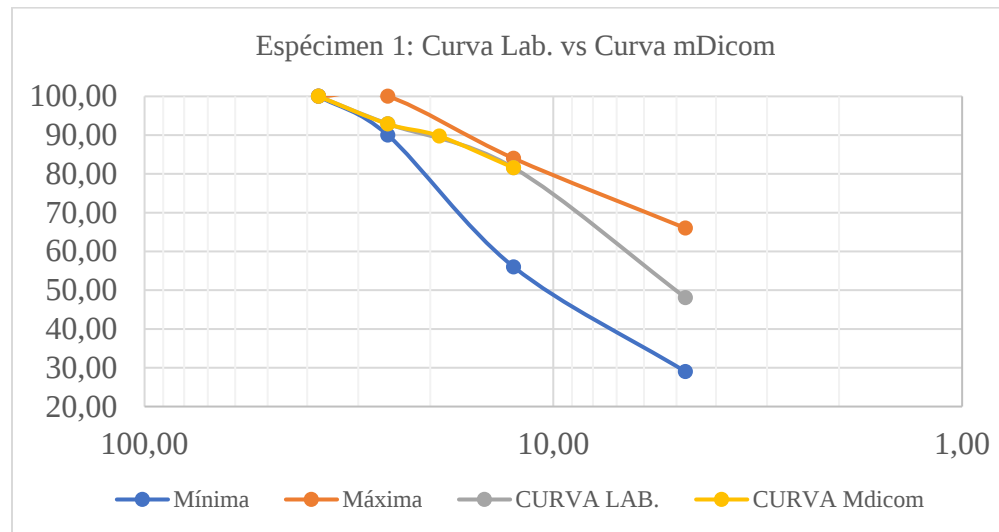
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.45 Caracterización para agregados de 1", ¾" y ½" para una M.A. Densa

Tamiz	Tamaño (mm)	Especificaciones			% Ret. Laboratorio	% Ret. Medido mDicom	CURVA Mdicom	Δ (grado de incertidumbre < 5%
		ASTM D3515						
		Mínimo	CURVA	Máximo				
1½"	37,5	100	100,00	100	0,00	0,00	100,00	0,000
1"	25,4	90	92,90	100	7,10	7,14	92,86	0,039
¾"	19,0	-	89,75	-	10,25	10,26	89,74	0,011
1/2"	12,5	56	81,55	84	18,45	18,45	81,55	0,001

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.96 Comparación curva granulométrica de laboratorio vs curva mDicom



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.46 Caracterización de tamaño para 1” en una M.A. Densa

ESPÉCIMEN	ÁREA 1" (mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% RET. ÁREA 1"	%Ret. Lab.	Δ (grado de incertidumbre) < 5%
1	571,10	7995,40	7,14%	7,10%	-0,04%
2	565,45	8016,34	7,05%	7,10%	0,05%
3	566,05	8055,27	7,03%	7,10%	0,07%
4	568,33	8055,00	7,06%	7,10%	0,04%
5	565,93	8055,00	7,03%	7,10%	0,07%
6	567,24	8084,60	7,02%	7,10%	0,08%
7	565,12	8014,03	7,05%	7,10%	0,05%
8	569,94	8127,78	7,01%	7,10%	0,09%
9	571,58	8127,79	7,03%	7,10%	0,07%
10	570,17	8127,80	7,02%	7,10%	0,08%
11	577,42	8127,79	7,10%	7,10%	0,00%
12	575,63	8156,92	7,06%	7,10%	0,04%
13	567,59	7997,98	7,10%	7,10%	0,00%
14	570,87	8037,21	7,10%	7,10%	0,00%
15	561,55	7945,80	7,07%	7,10%	0,03%
16	570,77	7997,99	7,14%	7,10%	-0,04%
17	563,20	7997,98	7,04%	7,10%	0,06%
18	569,51	8037,19	7,09%	7,10%	0,01%
19	565,90	7997,98	7,08%	7,10%	0,02%
20	574,92	8037,13	7,15%	7,10%	-0,05%
21	572,05	8011,03	7,14%	7,10%	-0,04%
22	571,38	8024,08	7,12%	7,10%	-0,02%
23	575,81	8063,32	7,14%	7,10%	-0,04%
24	570,00	8050,25	7,08%	7,10%	0,02%
25	561,92	7997,99	7,03%	7,10%	0,07%
26	570,07	8129,05	7,01%	7,10%	0,09%
27	571,53	7997,99	7,15%	7,10%	-0,05%
28	574,66	8037,00	7,15%	7,10%	-0,05%
29	569,11	7986,81	7,13%	7,10%	-0,03%
30	568,29	8047,81	7,06%	7,10%	0,04%
Media =			7,08%	Δprom. =	0,02%
Desviación =			0,05%		
Mínimo =			7,01%		
Máximo =			7,15%		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.47 Caracterización de tamaño para ¾” en una M.A. Densa

ESPÉCIMEN	ÁREA ¾” (mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% RET. ÁREA ¾”	%Ret. Lab.	Δ (grado de incertidumbre) < 5%
1	820,29	7995,40	10,26%	10,20%	-0,06%
2	821,05	8016,34	10,24%	10,20%	-0,04%
3	819,84	8055,27	10,18%	10,20%	0,02%
4	825,60	8055,00	10,25%	10,20%	-0,05%
5	825,07	8055,00	10,24%	10,20%	-0,04%
6	822,97	8084,60	10,18%	10,20%	0,02%
7	820,00	8014,03	10,23%	10,20%	-0,03%
8	829,56	8127,78	10,21%	10,20%	-0,01%
9	825,00	8127,79	10,15%	10,20%	0,05%
10	831,08	8127,80	10,23%	10,20%	-0,03%
11	827,49	8127,79	10,18%	10,20%	0,02%
12	830,26	8156,92	10,18%	10,20%	0,02%
13	818,43	7997,98	10,23%	10,20%	-0,03%
14	823,84	8037,21	10,25%	10,20%	-0,05%
15	815,39	7945,80	10,26%	10,20%	-0,06%
16	820,55	7997,99	10,26%	10,20%	-0,06%
17	817,39	7997,98	10,22%	10,20%	-0,02%
18	826,03	8037,19	10,28%	10,20%	-0,08%
19	815,62	7997,98	10,20%	10,20%	0,00%
20	818,22	8037,13	10,18%	10,20%	0,02%
21	817,01	8011,03	10,20%	10,20%	0,00%
22	820,58	8024,08	10,23%	10,20%	-0,03%
23	826,99	8063,32	10,26%	10,20%	-0,06%
24	825,00	8050,25	10,25%	10,20%	-0,05%
25	816,49	7997,99	10,21%	10,20%	-0,01%
26	833,91	8129,05	10,26%	10,20%	-0,06%
27	821,77	7997,99	10,27%	10,20%	-0,07%
28	818,05	8037,00	10,18%	10,20%	0,02%
29	819,72	7986,81	10,26%	10,20%	-0,06%
30	817,14	8047,81	10,15%	10,20%	0,05%
Media =			10,22%	Δprom. =	-0,02%
Desviación =			0,04%		
Mínimo =			10,15%		
Máximo =			10,28%		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.48 Caracterización de tamaño para ½” en una M.A. Densa

ESPÉCIMEN	ÁREA 1/2" (mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% RET. ÁREA 1/2"	%Ret. Lab.	Δ (grado de incertidumbre) < 5%
1	1475,11	7995,40	18,45%	18,40%	-0,05%
2	1478,55	8016,34	18,44%	18,40%	-0,04%
3	1480,44	8055,27	18,38%	18,40%	0,02%
4	1483,77	8055,00	18,42%	18,40%	-0,02%
5	1486,08	8055,00	18,45%	18,40%	-0,05%
6	1485,00	8084,60	18,37%	18,40%	0,03%
7	1472,79	8014,03	18,38%	18,40%	0,02%
8	1495,96	8127,78	18,41%	18,40%	-0,01%
9	1497,43	8127,79	18,42%	18,40%	-0,02%
10	1490,47	8127,80	18,34%	18,40%	0,06%
11	1492,53	8127,79	18,36%	18,40%	0,04%
12	1498,30	8156,92	18,37%	18,40%	0,03%
13	1470,55	7997,98	18,39%	18,40%	0,01%
14	1478,45	8037,21	18,40%	18,40%	0,00%
15	1466,93	7945,80	18,46%	18,40%	-0,06%
16	1471,02	7997,99	18,39%	18,40%	0,01%
17	1475,47	7997,98	18,45%	18,40%	-0,05%
18	1477,04	8037,19	18,38%	18,40%	0,02%
19	1475,66	7997,98	18,45%	18,40%	-0,05%
20	1478,09	8037,13	18,39%	18,40%	0,01%
21	1474,73	8011,03	18,41%	18,40%	-0,01%
22	1478,55	8024,08	18,43%	18,40%	-0,03%
23	1485,03	8063,32	18,42%	18,40%	-0,02%
24	1480,11	8050,25	18,39%	18,40%	0,01%
25	1471,50	7997,99	18,40%	18,40%	0,00%
26	1491,82	8129,05	18,35%	18,40%	0,05%
27	1475,22	7997,99	18,44%	18,40%	-0,04%
28	1481,49	8037,00	18,43%	18,40%	-0,03%
29	1470,35	7986,81	18,41%	18,40%	-0,01%
30	1484,07	8047,81	18,44%	18,40%	-0,04%
Media =			18,41%	Δprom. =	-0,01%
Desviación =			0,03%		
Mínimo =			18,34%		
Máximo =			18,46%		

Fuente: Elaboración propia

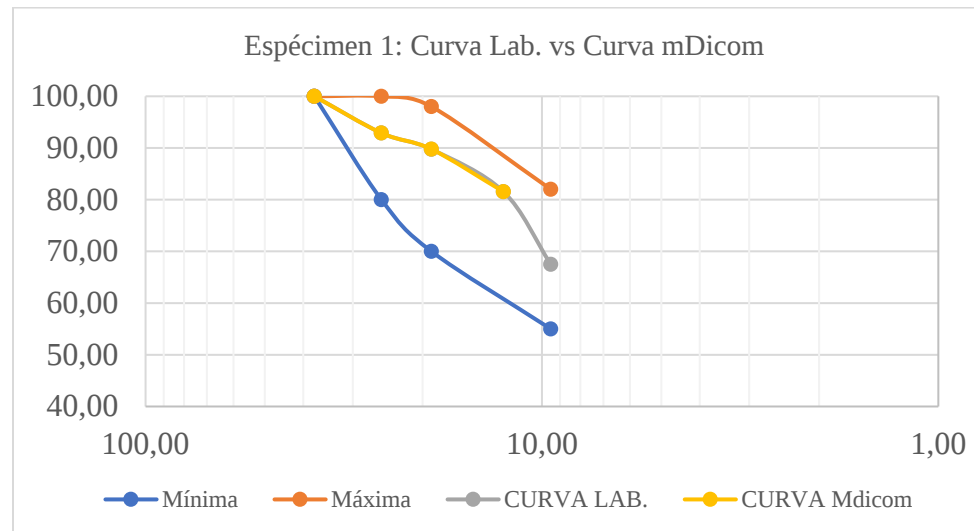
- ✓ Porcentaje de retenido según el tamaño de partícula obtenido mediante la medición a las tomografías axiales para mezclas asfálticas finas.

Tabla 3.49 Caracterización para agregados de 1", ¾" y ½" para una M.A. Fina

Tamiz	Tamaño (mm)	Especificaciones			% Ret. Laboratorio	% Ret. Medido mDicom	CURVA Mdicom	Δ (grado de incertidumbre) < 5%
		ASTM D3515						
		Mínimo	CURVA	Máximo				
1½"	37,5	100	100,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,000
1"	25,4	80	92,90	100,00	7,10	7,11	92,89	0,009
¾"	19,0	70	89,75	98,00	10,25	10,24	89,76	-0,009
1/2"	12,5	-	81,55	-	18,45	18,45	81,55	0,001
3/8"	9,5	55	67,50	82,00	32,50			

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.97 Comparación curva granulométrica de laboratorio vs curva mDicom



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.50 Caracterización de tamaño para 1” en una M.A. Fina

ESPÉCIMEN	ÁREA 1" (mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% RET. ÁREA 1"	%Ret. Lab.	Δ (grado de incertidumbre) < 5%
1	570,00	8015,33	7,11%	7,10%	-0,01%
2	570,00	8056,59	7,07%	7,10%	0,03%
3	565,11	8015,35	7,05%	7,10%	0,05%
4	572,45	8098,63	7,07%	7,10%	0,03%
5	573,55	8064,61	7,11%	7,10%	-0,01%
6	571,37	8016,48	7,13%	7,10%	-0,03%
7	569,20	8064,81	7,06%	7,10%	0,04%
8	567,24	8015,67	7,08%	7,10%	0,02%
9	571,34	7984,21	7,16%	7,10%	-0,06%
10	567,01	8005,10	7,08%	7,10%	0,02%
11	565,77	7980,20	7,09%	7,10%	0,01%
12	569,04	7984,21	7,13%	7,10%	-0,03%
13	571,84	8004,20	7,14%	7,10%	-0,04%
14	566,90	8005,60	7,08%	7,10%	0,02%
15	567,32	8000,45	7,09%	7,10%	0,01%
16	565,67	8016,48	7,06%	7,10%	0,04%
17	571,89	8015,33	7,13%	7,10%	-0,03%
18	578,27	8098,63	7,14%	7,10%	-0,04%
19	570,67	8015,33	7,12%	7,10%	-0,02%
20	568,32	8015,00	7,09%	7,10%	0,01%
21	571,22	8015,80	7,13%	7,10%	-0,03%
22	568,11	8010,50	7,09%	7,10%	0,01%
23	571,87	8050,47	7,10%	7,10%	0,00%
24	574,34	8056,59	7,13%	7,10%	-0,03%
25	578,20	8056,00	7,18%	7,10%	-0,08%
26	571,56	8056,60	7,09%	7,10%	0,01%
27	570,20	8056,00	7,08%	7,10%	0,02%
28	572,90	8056,80	7,11%	7,10%	-0,01%
29	574,04	8041,87	7,14%	7,10%	-0,04%
30	567,26	8040,00	7,06%	7,10%	0,04%
Media =			7,10%	Δprom. =	0,00%
Desviación =			0,03%		
Mínimo =			7,05%		
Máximo =			7,18%		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.51 Caracterización de tamaño para ¾” en una M.A. Fina

ESPÉCIMEN	ÁREA ¾” (mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% RET. ÁREA ¾”	%Ret. Lab.	Δ (grado de incertidumbre) < 5%
1	821,03	8015,33	10,24%	10,25%	0,01%
2	828,05	8056,59	10,28%	10,25%	-0,03%
3	820,11	8015,35	10,23%	10,25%	0,02%
4	832,17	8098,63	10,28%	10,25%	-0,03%
5	829,02	8064,61	10,28%	10,25%	-0,03%
6	823,00	8016,48	10,27%	10,25%	-0,02%
7	820,37	8064,81	10,17%	10,25%	0,08%
8	822,19	8015,67	10,26%	10,25%	-0,01%
9	821,10	7984,21	10,28%	10,25%	-0,03%
10	817,90	8005,10	10,22%	10,25%	0,03%
11	815,65	7980,20	10,22%	10,25%	0,03%
12	818,45	7984,21	10,25%	10,25%	0,00%
13	818,07	8004,20	10,22%	10,25%	0,03%
14	820,06	8005,60	10,24%	10,25%	0,01%
15	825,10	8000,45	10,31%	10,25%	-0,06%
16	826,55	8016,48	10,31%	10,25%	-0,06%
17	820,15	8015,33	10,23%	10,25%	0,02%
18	835,34	8098,63	10,31%	10,25%	-0,06%
19	825,00	8015,33	10,29%	10,25%	-0,04%
20	820,91	8015,00	10,24%	10,25%	0,01%
21	822,43	8015,80	10,26%	10,25%	-0,01%
22	820,37	8010,50	10,24%	10,25%	0,01%
23	823,12	8050,47	10,22%	10,25%	0,03%
24	821,00	8056,59	10,19%	10,25%	0,06%
25	824,28	8056,00	10,23%	10,25%	0,02%
26	825,00	8056,60	10,24%	10,25%	0,01%
27	830,87	8056,00	10,31%	10,25%	-0,06%
28	828,53	8056,80	10,28%	10,25%	-0,03%
29	823,19	8041,87	10,24%	10,25%	0,01%
30	825,05	8040,00	10,26%	10,25%	-0,01%
Media =			10,25%	Δprom. =	0,00%
Desviación =			0,04%		
Mínimo =			10,17%		
Máximo =			10,31%		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.52 Caracterización de tamaño para 1/2" en una M.A. Fina

ESPÉCIMEN	ÁREA 1/2"(mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% RET. ÁREA 1/2"	%Ret. Lab.	Δ (grado de incertidumbre) < 5%
1	1480,11	8015,33	18,47%	18,45%	-0,02%
2	1482,67	8056,59	18,40%	18,45%	0,05%
3	1485,00	8015,35	18,53%	18,45%	-0,08%
4	1491,09	8098,63	18,41%	18,45%	0,04%
5	1487,05	8064,61	18,44%	18,45%	0,01%
6	1483,87	8016,48	18,51%	18,45%	-0,06%
7	1489,00	8064,81	18,46%	18,45%	-0,01%
8	1480,39	8015,67	18,47%	18,45%	-0,02%
9	1478,43	7984,21	18,52%	18,45%	-0,07%
10	1480,55	8005,10	18,50%	18,45%	-0,05%
11	1478,50	7980,20	18,53%	18,45%	-0,08%
12	1479,40	7984,21	18,53%	18,45%	-0,08%
13	1472,17	8004,20	18,39%	18,45%	0,06%
14	1480,67	8005,60	18,50%	18,45%	-0,05%
15	1479,61	8000,45	18,49%	18,45%	-0,04%
16	1485,66	8016,48	18,53%	18,45%	-0,08%
17	1484,91	8015,33	18,53%	18,45%	-0,08%
18	1492,05	8098,63	18,42%	18,45%	0,03%
19	1485,01	8015,33	18,53%	18,45%	-0,08%
20	1480,23	8015,00	18,47%	18,45%	-0,02%
21	1486,38	8015,80	18,54%	18,45%	-0,09%
22	1483,04	8010,50	18,51%	18,45%	-0,06%
23	1485,70	8050,47	18,45%	18,45%	0,00%
24	1484,97	8056,59	18,43%	18,45%	0,02%
25	1483,10	8056,00	18,41%	18,45%	0,04%
26	1482,61	8056,60	18,40%	18,45%	0,05%
27	1482,21	8056,00	18,40%	18,45%	0,05%
28	1485,30	8056,80	18,44%	18,45%	0,01%
29	1481,32	8041,87	18,42%	18,45%	0,03%
30	1485,87	8040,00	18,48%	18,45%	-0,03%
Media =			18,47%	Δprom. =	-0,02%
Desviación =			0,05%		
Mínimo =			18,39%		
Máximo =			18,54%		

Fuente: Elaboración propia

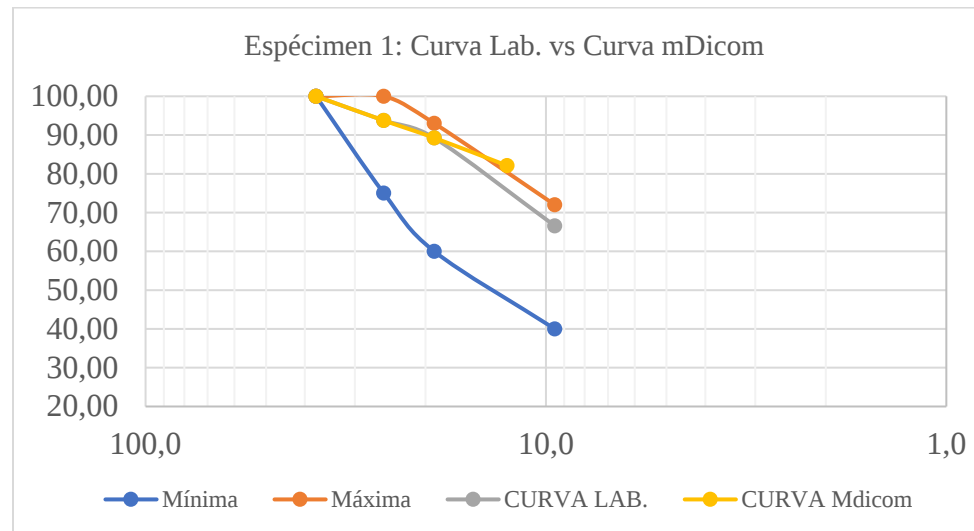
- ✓ Porcentaje de retenido según el tamaño de partícula obtenido mediante la medición a las tomografías axiales para mezclas asfálticas abiertas.

Tabla 3.53 Caracterización para agregados de 1", ¾" y ½" para una M.A. Abierta

Tamiz	Tamaño (mm)	Especificaciones			% Ret. Laboratorio	% Ret. Medido mDicom	CURVA Mdicom	Δ (grado de incertidumbre) < 5%
		ASTM D3515						
		Mínimo	CURVA	Máximo				
1½"	37,5	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,000
1"	25,4	75,00	93,75	100,00	6,25	6,25	93,75	0,001
¾"	19,0	60,00	89,24	93,00	10,76	10,73	89,27	-0,028
1/2"	12,5	-	82,09	-	17,91	17,88	82,12	-0,032
3/8"	9,5	40	66,58	72	33,42			

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.98 Comparación curva granulométrica de laboratorio vs curva mDicom



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.54 Caracterización de tamaño para 1” en una M.A. Abierta

ESPÉCIMEN	ÁREA 1" (mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% RET. ÁREA 1"	%Ret. Lab.	Δ (grado de incertidumbre) < 5%
1	510,00	8165,01	6,25%	6,25%	0,00%
2	510,21	8165,01	6,25%	6,25%	0,00%
3	510,02	8165,01	6,25%	6,25%	0,00%
4	509,11	8165,01	6,24%	6,25%	0,01%
5	503,79	8144,44	6,19%	6,25%	0,06%
6	506,90	8164,96	6,21%	6,25%	0,04%
7	500,45	8042,08	6,22%	6,25%	0,03%
8	509,75	8082,74	6,31%	6,25%	-0,06%
9	508,50	8082,90	6,29%	6,25%	-0,04%
10	501,89	8042,08	6,24%	6,25%	0,01%
11	505,77	8144,44	6,21%	6,25%	0,04%
12	504,82	8082,91	6,25%	6,25%	0,00%
13	509,03	8103,31	6,28%	6,25%	-0,03%
14	510,08	8103,41	6,29%	6,25%	-0,04%
15	501,05	8021,36	6,25%	6,25%	0,00%
16	504,66	8103,31	6,23%	6,25%	0,02%
17	500,74	8041,88	6,23%	6,25%	0,02%
18	500,55	8062,17	6,21%	6,25%	0,04%
19	504,04	8082,95	6,24%	6,25%	0,01%
20	507,32	8082,91	6,28%	6,25%	-0,03%
21	511,09	8103,31	6,31%	6,25%	-0,06%
22	513,05	8103,31	6,33%	6,25%	-0,08%
23	509,07	8123,88	6,27%	6,25%	-0,02%
24	510,13	8082,74	6,31%	6,25%	-0,06%
25	510,56	8123,88	6,28%	6,25%	-0,03%
26	510,09	8082,74	6,31%	6,25%	-0,06%
27	509,07	8082,74	6,30%	6,25%	-0,05%
28	503,15	8103,31	6,21%	6,25%	0,04%
29	512,01	8165,01	6,27%	6,25%	-0,02%
30	508,33	8165,01	6,23%	6,25%	0,02%
Media =			6,26%	Δprom. =	-0,01%
Desviación =			0,04%		
Mínimo =			6,19%		
Máximo =			6,33%		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.55 Caracterización de tamaño para ¾” en una M.A. Abierta

ESPÉCIMEN	ÁREA ¾” (mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% RET. ÁREA ¾”	%Ret. Lab.	Δ (grado de incertidumbre) < 5%
1	876,03	8165,01	10,73%	10,76%	0,03%
2	878,06	8165,01	10,75%	10,76%	0,01%
3	880,77	8165,01	10,79%	10,76%	-0,03%
4	878,07	8165,01	10,75%	10,76%	0,01%
5	876,68	8144,44	10,76%	10,76%	0,00%
6	880,66	8164,96	10,79%	10,76%	-0,03%
7	867,84	8042,08	10,79%	10,76%	-0,03%
8	871,43	8082,74	10,78%	10,76%	-0,02%
9	867,71	8082,9	10,74%	10,76%	0,02%
10	867,48	8042,08	10,79%	10,76%	-0,03%
11	875,75	8144,44	10,75%	10,76%	0,01%
12	867,11	8082,91	10,73%	10,76%	0,03%
13	871,38	8103,31	10,75%	10,76%	0,01%
14	871,07	8103,41	10,75%	10,76%	0,01%
15	858,47	8021,36	10,70%	10,76%	0,06%
16	870,33	8103,31	10,74%	10,76%	0,02%
17	861,78	8041,88	10,72%	10,76%	0,04%
18	867,74	8062,17	10,76%	10,76%	0,00%
19	868,00	8082,95	10,74%	10,76%	0,02%
20	867,10	8082,91	10,73%	10,76%	0,03%
21	870,11	8103,31	10,74%	10,76%	0,02%
22	871,47	8103,31	10,75%	10,76%	0,01%
23	871,71	8123,88	10,73%	10,76%	0,03%
24	867,44	8082,74	10,73%	10,76%	0,03%
25	871,07	8123,88	10,72%	10,76%	0,04%
26	867,83	8082,74	10,74%	10,76%	0,02%
27	870,38	8082,74	10,77%	10,76%	-0,01%
28	870,44	8103,31	10,74%	10,76%	0,02%
29	877,81	8165,01	10,75%	10,76%	0,01%
30	875,11	8165,01	10,72%	10,76%	0,04%
Media =			10,75%	Δprom. =	0,01%
Desviación =			0,02%		
Mínimo =			10,70%		
Máximo =			10,79%		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.56 Caracterización de tamaño para ½” en una M.A. Abierta

ESPÉCIMEN	ÁREA 1/2"(mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% RET. ÁREA 1/2"	%Ret. Lab.	Δ (grado de incertidumbre) < 5%
1	1460,11	8165,01	17,88%	17,91%	0,03%
2	1460,66	8165,01	17,89%	17,91%	0,02%
3	1466,00	8165,01	17,95%	17,91%	-0,04%
4	1460,24	8165,01	17,88%	17,91%	0,03%
5	1461,66	8144,44	17,95%	17,91%	-0,04%
6	1462,46	8164,96	17,91%	17,91%	0,00%
7	1438,11	8042,08	17,88%	17,91%	0,03%
8	1451,44	8082,74	17,96%	17,91%	-0,05%
9	1447,72	8082,9	17,91%	17,91%	0,00%
10	1440,44	8042,08	17,91%	17,91%	0,00%
11	1459,69	8144,44	17,92%	17,91%	-0,01%
12	1449,91	8082,91	17,94%	17,91%	-0,03%
13	1447,96	8103,31	17,87%	17,91%	0,04%
14	1449,00	8103,41	17,88%	17,91%	0,03%
15	1440,68	8021,36	17,96%	17,91%	-0,05%
16	1454,04	8103,31	17,94%	17,91%	-0,03%
17	1440,66	8041,88	17,91%	17,91%	0,00%
18	1443,08	8062,17	17,90%	17,91%	0,01%
19	1448,68	8082,95	17,92%	17,91%	-0,01%
20	1450,47	8082,91	17,94%	17,91%	-0,03%
21	1447,66	8103,31	17,87%	17,91%	0,04%
22	1454,70	8103,31	17,95%	17,91%	-0,04%
23	1457,84	8123,88	17,95%	17,91%	-0,04%
24	1448,11	8082,74	17,92%	17,91%	-0,01%
25	1456,96	8123,88	17,93%	17,91%	-0,02%
26	1448,89	8082,74	17,93%	17,91%	-0,02%
27	1450,06	8082,74	17,94%	17,91%	-0,03%
28	1451,67	8103,31	17,91%	17,91%	0,00%
29	1459,11	8165,01	17,87%	17,91%	0,04%
30	1459,47	8165,01	17,87%	17,91%	0,04%
Media =			17,92%	Δprom. =	-0,01%
Desviación =			0,03%		
Mínimo =			17,87%		
Máximo =			17,96%		

Fuente: Elaboración propia

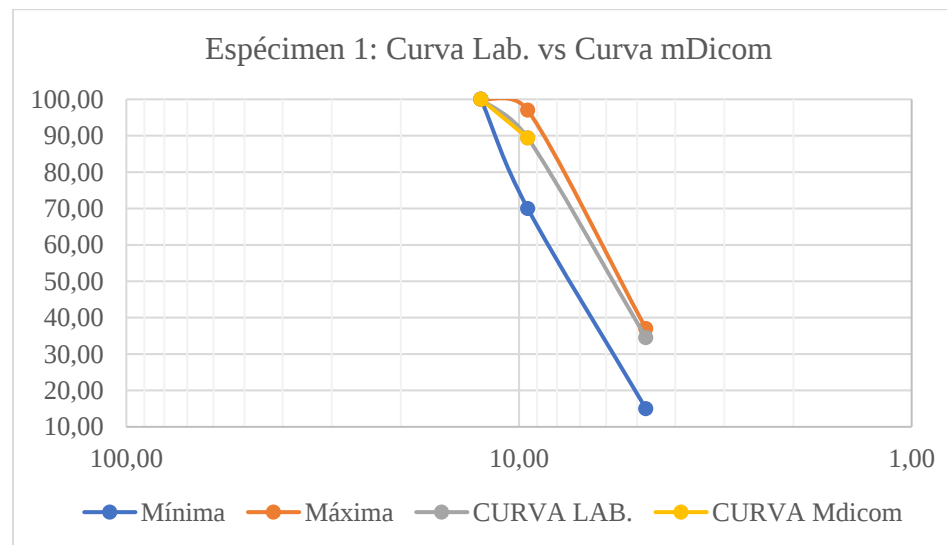
- ✓ Porcentaje de retenido según el tamaño de partícula obtenido mediante la medición a las tomografías axiales para mezclas asfálticas drenantes.

Tabla 3.57 Caracterización para agregados de 1", ¾" y ½" para una M.A. Drenante

Tamiz	Tamaño (mm)	Especificaciones			% Ret. Laboratorio	% Ret. Medido mDicom	CURVA Mdicom	Δ (grado de incertidumbre) < 5%
		ASTM D3515						
		Mínimo	CURVA	Máximo				
1/2"	12,5	100	100,00	100	0,00	0,00	100,00	0,000
3/8"	9,50	70	89,39	97	10,61	10,61	89,39	0,004
1/4"	6,35	-	70,75	-	29,25	29,24	70,76	-0,013
Nº4	4,75	15	34,48	37	65,52			

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.99 Comparación curva granulométrica de laboratorio vs curva mDicom



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.58 Caracterización de tamaño para 3/8" en una M.A. Drenante

ESPÉCIMEN	ÁREA 3/8" (mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% RET. ÁREA 3/8"	%Ret. Lab.	Δ (grado de incertidumbre) < 5%
1	853,11	8037,21	10,61%	10,61%	0,00%
2	851,01	7997,99	10,64%	10,61%	-0,03%
3	856,23	8024,09	10,67%	10,61%	-0,06%
4	850,33	7997,99	10,63%	10,61%	-0,02%
5	851,59	7997,98	10,65%	10,61%	-0,04%
6	853,23	7997,99	10,67%	10,61%	-0,06%
7	855,22	8050,17	10,62%	10,61%	-0,01%
8	866,11	8129,06	10,65%	10,61%	-0,04%
9	859,35	8063,42	10,66%	10,61%	-0,05%
10	850,77	7997,99	10,64%	10,61%	-0,03%
11	855,68	8037,21	10,65%	10,61%	-0,04%
12	850,55	7997,98	10,63%	10,61%	-0,02%
13	855,65	7997,99	10,70%	10,61%	-0,09%
14	852,88	7997,98	10,66%	10,61%	-0,05%
15	848,00	7997,00	10,60%	10,61%	0,01%
16	849,33	8000,54	10,62%	10,61%	-0,01%
17	852,71	8015,60	10,64%	10,61%	-0,03%
18	851,90	7998,00	10,65%	10,61%	-0,04%
19	848,67	7997,89	10,61%	10,61%	0,00%
20	855,00	7997,99	10,69%	10,61%	-0,08%
21	855,10	7997,99	10,69%	10,61%	-0,08%
22	857,55	8037,13	10,67%	10,61%	-0,06%
23	850,04	8024,08	10,59%	10,61%	0,02%
24	856,08	8050,31	10,63%	10,61%	-0,02%
25	852,02	8102,79	10,52%	10,61%	0,09%
26	857,00	8129,10	10,54%	10,61%	0,07%
27	855,06	7997,98	10,69%	10,61%	-0,08%
28	856,19	8037,19	10,65%	10,61%	-0,04%
29	858,73	8050,26	10,67%	10,61%	-0,06%
30	852,66	7997,98	10,66%	10,61%	-0,05%
Media =			10,64%	Δprom. =	-0,03%
Desviación =			0,04%		
Mínimo =			10,52%		
Máximo =			10,70%		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.59 Caracterización de tamaño para ¼” en una M.A. Drenante

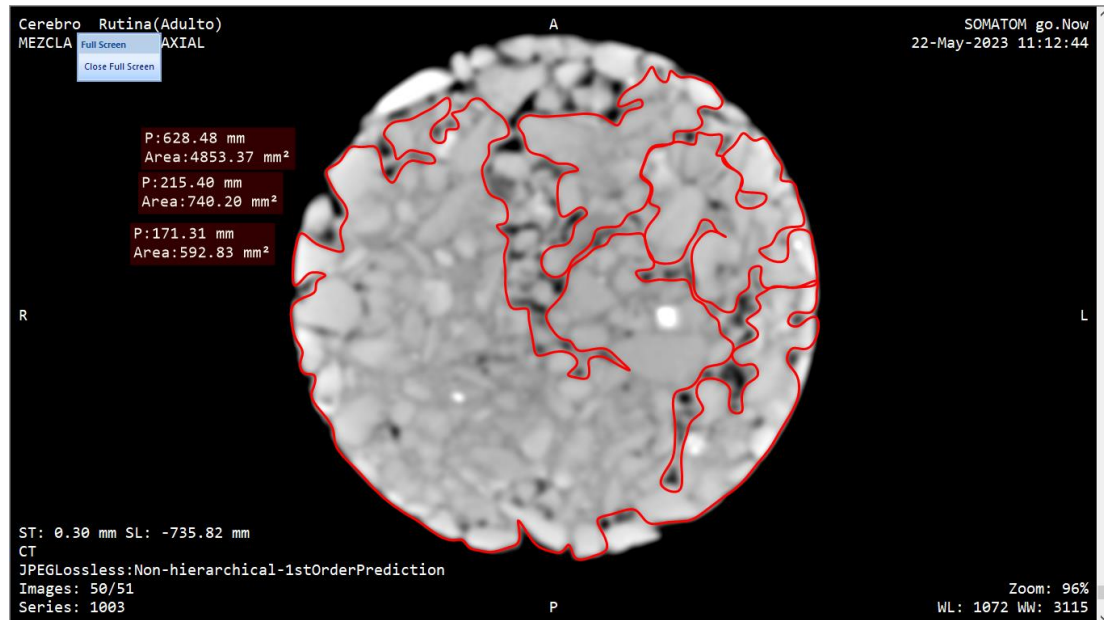
ESPÉCIMEN	ÁREA 1/4" (mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% RET. ÁREA 1/4"	%Ret. Lab.	Δ (grado de incertidumbre) < 5%
1	2350,33	8037,21	29,24%	29,25%	0,01%
2	2350,66	7997,99	29,39%	29,25%	-0,14%
3	2351,33	8024,09	29,30%	29,25%	-0,05%
4	2350,82	7997,99	29,39%	29,25%	-0,14%
5	2345,38	7997,98	29,32%	29,25%	-0,07%
6	2330,73	7997,99	29,14%	29,25%	0,11%
7	2347,67	8050,17	29,16%	29,25%	0,09%
8	2375,11	8129,06	29,22%	29,25%	0,03%
9	2355,33	8063,42	29,21%	29,25%	0,04%
10	2353,39	7997,99	29,42%	29,25%	-0,17%
11	2350,23	8037,21	29,24%	29,25%	0,01%
12	2340,00	7997,98	29,26%	29,25%	-0,01%
13	2345,33	7997,99	29,32%	29,25%	-0,07%
14	2341,91	7997,98	29,28%	29,25%	-0,03%
15	2343,11	7997,00	29,30%	29,25%	-0,05%
16	2340,87	8000,54	29,26%	29,25%	-0,01%
17	2340,78	8015,60	29,20%	29,25%	0,05%
18	2343,90	7998,00	29,31%	29,25%	-0,06%
19	2343,22	7997,89	29,30%	29,25%	-0,05%
20	2343,00	7997,99	29,29%	29,25%	-0,04%
21	2339,90	7997,99	29,26%	29,25%	-0,01%
22	2347,70	8037,13	29,21%	29,25%	0,04%
23	2343,36	8024,08	29,20%	29,25%	0,05%
24	2350,33	8050,31	29,20%	29,25%	0,05%
25	2369,20	8102,79	29,24%	29,25%	0,01%
26	2375,77	8129,10	29,23%	29,25%	0,02%
27	2340,11	7997,98	29,26%	29,25%	-0,01%
28	2350,33	8037,19	29,24%	29,25%	0,01%
29	2353,37	8050,26	29,23%	29,25%	0,02%
30	2341,38	7997,98	29,27%	29,25%	-0,02%
Media =			29,26%	Δprom. =	-0,01%
Desviación =			0,07%		
Mínimo =			29,14%		
Máximo =			29,42%		

Fuente: Elaboración propia

3.9 Distribución de partículas

Se medirá el área de distribución donde no exista vacíos para los 4 tipos de mezclas asfálticas como se demuestra en la figura siguiente. El respaldo de los resultados se encontrará en el ANEXO XIV.

Figura 3.100 Distribución para una mezcla asfáltica Densa

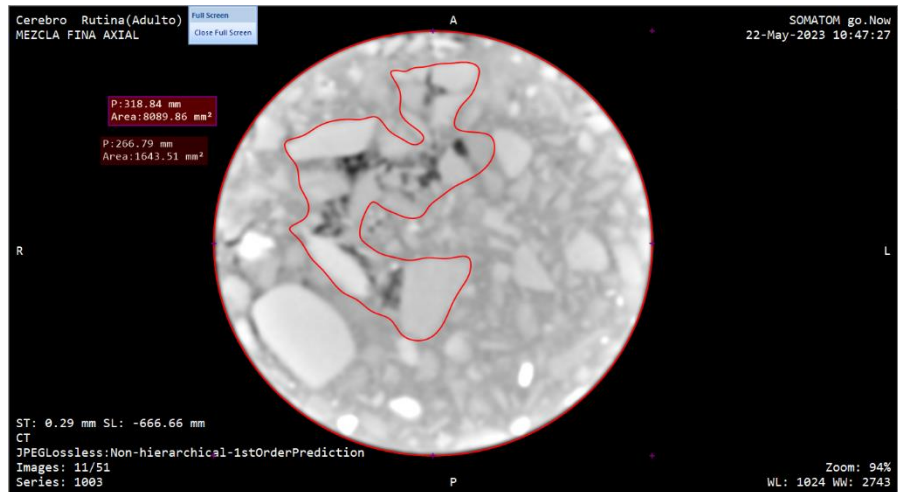


Fuente: Elaboración propia

Para la **figura 3.100** se medirá toda el área libre de vacíos con el programa mDicom el cual sobre el área total de la imagen nos dará el porcentaje de vacíos que presenta dicha imagen tomográfica para una mezcla asfáltica densa, esto será representado en una tabla resumen la **tabla 3.60**, la cual será respaldada con imágenes medidas en el ANEXO XIV. Para la **figura 3.101** se medirá toda el área libre de vacíos con el programa mDicom el cual sobre el área total de la imagen nos dará el porcentaje de vacíos que presenta dicha imagen tomográfica para una mezcla asfáltica fina, esto será representado en una tabla resumen la **tabla 3.61**, la cual será respaldada con imágenes medidas en el ANEXO XIV. Para la **figura 3.102** se medirá toda el área libre de vacíos con el programa mDicom el cual sobre el área total de la imagen nos dará el porcentaje de vacíos que presenta dicha imagen tomográfica para una mezcla asfáltica abierta, esto será representado en una tabla resumen la **tabla 3.62**, la cual será respaldada con imágenes medidas en el ANEXO XIV.

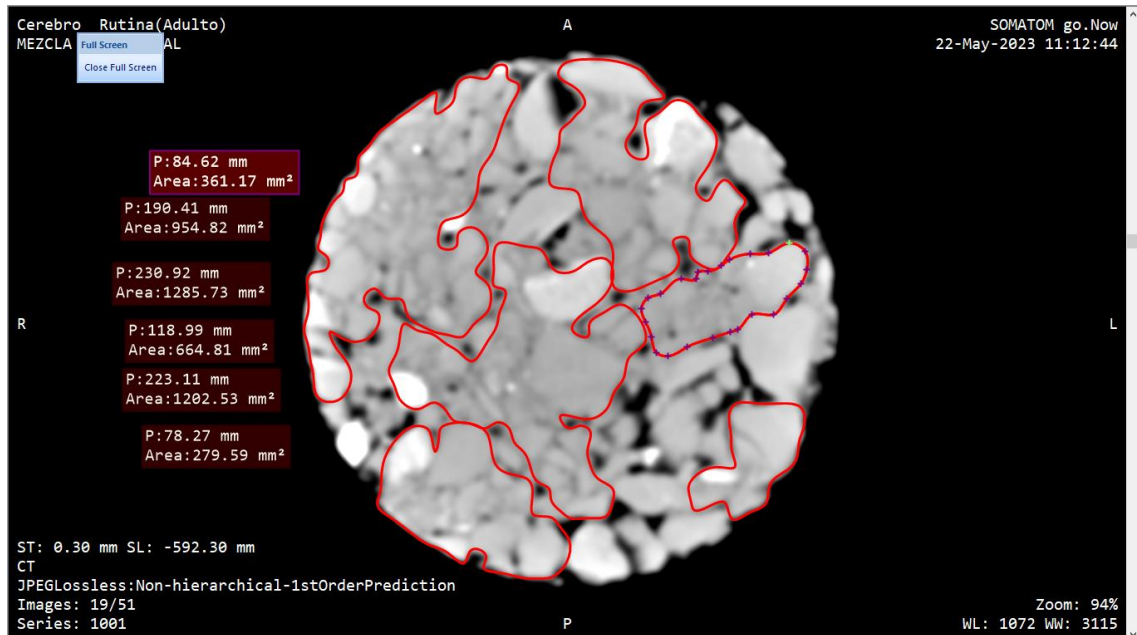
Para la **figura 3.103** se medirá toda el área libre de vacíos con el programa mDicom el cual sobre el área total de la imagen nos dará el porcentaje de vacíos que presenta dicha imagen tomográfica para una mezcla asfáltica drenante, esto será representado en una tabla resumen la **tabla 3.63**, la cual será respaldada con imágenes medidas en el ANEXO XIV.

Figura 3.101 Distribución para una mezcla asfáltica fina



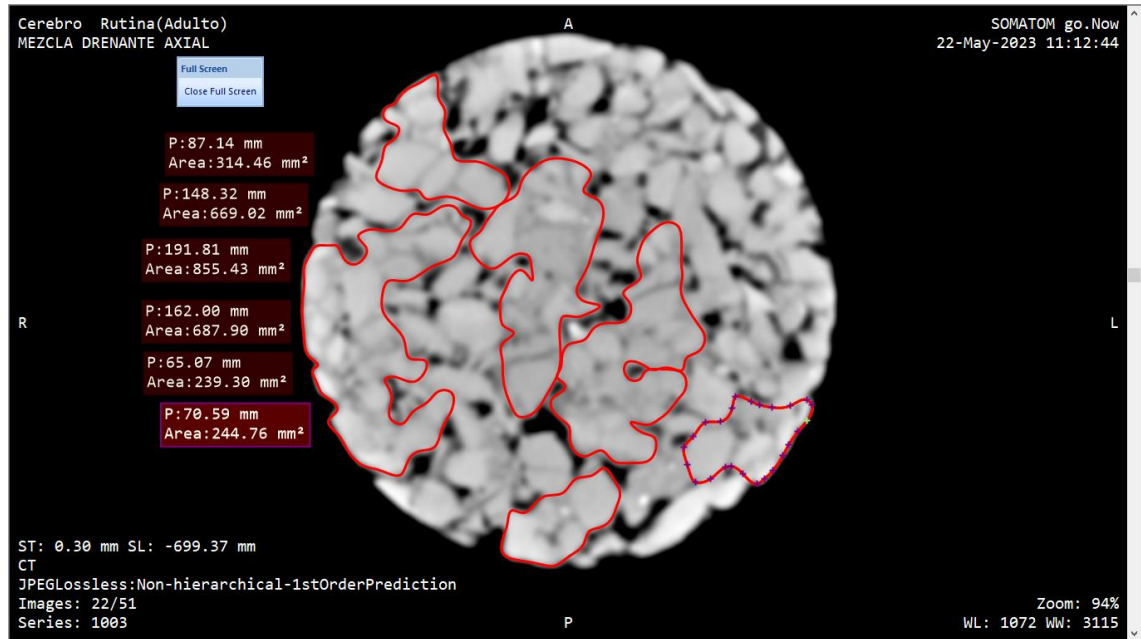
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.102 Distribución para una mezcla asfáltica abierta



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.103 Distribución para una mezcla asfáltica drenante



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.60 Distribución de partículas en M.A. Densa

Mezcla asfáltica densa			
ESPÉCIMEN	ÁREA DISTRIBUIDA (mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% De distribución de partículas
1	6031,24	7995,40	75,43%
2	6326,23	8016,34	78,92%
3	6356,04	8055,27	78,91%
4	6555,21	8055,00	81,38%
5	6400,85	8055,00	79,46%
6	6134,93	8084,60	75,88%
7	6269,20	8014,03	78,23%
8	6441,48	8127,78	79,25%
9	6166,49	8127,79	75,87%
10	6348,56	8127,80	78,11%
11	6474,80	8127,79	79,66%
12	6041,00	8156,92	74,06%
13	6375,74	7997,98	79,72%
14	6260,05	8037,21	77,89%
15	6260,46	7945,80	78,79%
16	6345,45	7997,99	79,34%
17	6279,23	7997,98	78,51%
18	6441,48	8037,19	80,15%
19	5844,40	7997,98	73,07%
20	6154,38	8037,13	76,57%
21	5930,65	8011,03	74,03%
22	6076,50	8024,08	75,73%
23	6113,45	8063,32	75,82%
24	6186,40	8050,25	76,85%
25	5896,44	7997,99	73,72%
26	5678,34	8129,05	69,85%
27	6250,70	7997,99	78,15%
28	6640,09	8037,00	82,62%
29	6655,02	7986,81	83,33%
30	6117,45	8047,81	76,01%
Media =			77,51%
Desviación =			2,91%
Mínimo =			69,85%
Máximo =			83,33%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.61 Distribución de partículas en M.A. Fina

Mezcla asfáltica fina			
ESPÉCIMEN	ÁREA DISTRIBUIDA (mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% De distribución de partículas
1	5805,03	8015,33	72,42%
2	5809,38	8056,59	72,11%
3	5555,31	8015,35	69,31%
4	5980,98	8098,63	73,85%
5	7435,19	8064,61	92,20%
6	6270,70	8016,48	78,22%
7	6446,35	8064,81	79,93%
8	5473,96	8015,67	68,29%
9	6117,55	7984,21	76,62%
10	5838,38	8005,10	72,93%
11	5865,34	7980,20	73,50%
12	5386,51	7984,21	67,46%
13	5248,11	8004,20	65,57%
14	6071,66	8005,60	75,84%
15	5809,38	8000,45	72,61%
16	5878,83	8016,48	73,33%
17	6116,76	8015,33	76,31%
18	6425,80	8098,63	79,34%
19	5773,50	8015,33	72,03%
20	5655,68	8015,00	70,56%
21	6095,83	8015,80	76,05%
22	6109,82	8010,50	76,27%
23	6030,38	8050,47	74,91%
24	5733,45	8056,59	71,16%
25	6099,70	8056,00	75,72%
26	6268,89	8056,60	77,81%
27	6146,75	8056,00	76,30%
28	6534,84	8056,80	81,11%
29	7067,43	8041,87	87,88%
30	7472,07	8040,00	92,94%
Media =			75,75%
Desviación =			6,36%
Mínimo =			65,57%
Máximo =			92,94%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.62 Distribución de partículas en M.A. Abierta

Mezcla asfáltica abierta			
ESPÉCIMEN	ÁREA DISTRIBUIDA (mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% De distribución de partículas
1	5042,91	8173,78	61,70%
2	5431,98	8152,92	66,63%
3	4821,81	8053,28	59,87%
4	4706,20	8051,61	58,45%
5	4509,67	8127,79	55,48%
6	4241,09	8030,48	52,81%
7	4831,33	8030,00	60,17%
8	4898,42	8050,00	60,85%
9	4854,97	8045,60	60,34%
10	4647,49	8066,47	57,61%
11	4721,01	8066,00	58,53%
12	4856,84	8080,00	60,11%
13	5069,73	8045,33	63,01%
14	4976,81	7985,54	62,32%
15	4679,77	8087,31	57,87%
16	4613,35	8087,00	57,05%
17	4943,04	8030,47	61,55%
18	4846,55	8030,48	60,35%
19	4631,50	8030,40	57,67%
20	4748,65	8055,28	58,95%
21	4738,41	7997,99	59,25%
22	4583,69	7997,90	57,31%
23	4787,70	8050,00	59,47%
24	4724,85	8050,30	58,69%
25	4037,26	8050,00	50,15%
26	4554,04	7997,00	56,95%
27	4418,99	8030,48	55,03%
28	4765,23	8030,00	59,34%
29	4449,58	8045,00	55,31%
30	4727,72	7998,00	59,11%
Media =			58,73%
Desviación =			3,12%
Mínimo =			50,15%
Máximo =			66,63%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.63 Distribución de partículas en M.A. Drenante

Mezcla asfáltica drenante o porosa			
ESPÉCIMEN	ÁREA DISTRIBUIDA (mm2)	ÁREA TOTAL (mm2)	% De distribución de partículas
1	3529,56	8037,21	43,92%
2	2903,27	7997,99	36,30%
3	2589,82	8024,09	32,28%
4	3541,93	7997,99	44,29%
5	2841,86	7997,98	35,53%
6	2422,10	7997,99	30,28%
7	2448,11	8050,17	30,41%
8	2261,78	8129,06	27,82%
9	2255,43	8063,42	27,97%
10	2545,57	7997,99	31,83%
11	2334,53	8037,21	29,05%
12	3235,37	7997,98	40,45%
13	2167,24	7997,99	27,10%
14	2226,58	7997,98	27,84%
15	2463,40	7997,00	30,80%
16	2374,50	8000,54	29,68%
17	2362,95	8015,60	29,48%
18	2586,34	7998,00	32,34%
19	2293,56	7997,89	28,68%
20	2264,35	7997,99	28,31%
21	2401,10	7997,99	30,02%
22	3040,67	8037,13	37,83%
23	3363,66	8024,08	41,92%
24	3360,86	8050,31	41,75%
25	3139,36	8102,79	38,74%
26	2439,88	8129,10	30,01%
27	2347,86	7997,98	29,36%
28	2180,66	8037,19	27,13%
29	3010,87	8050,26	37,40%
30	2572,38	7997,98	32,16%
Media =			33,02%
Desviación =			5,36%
Mínimo =			27,10%
Máximo =			44,29%

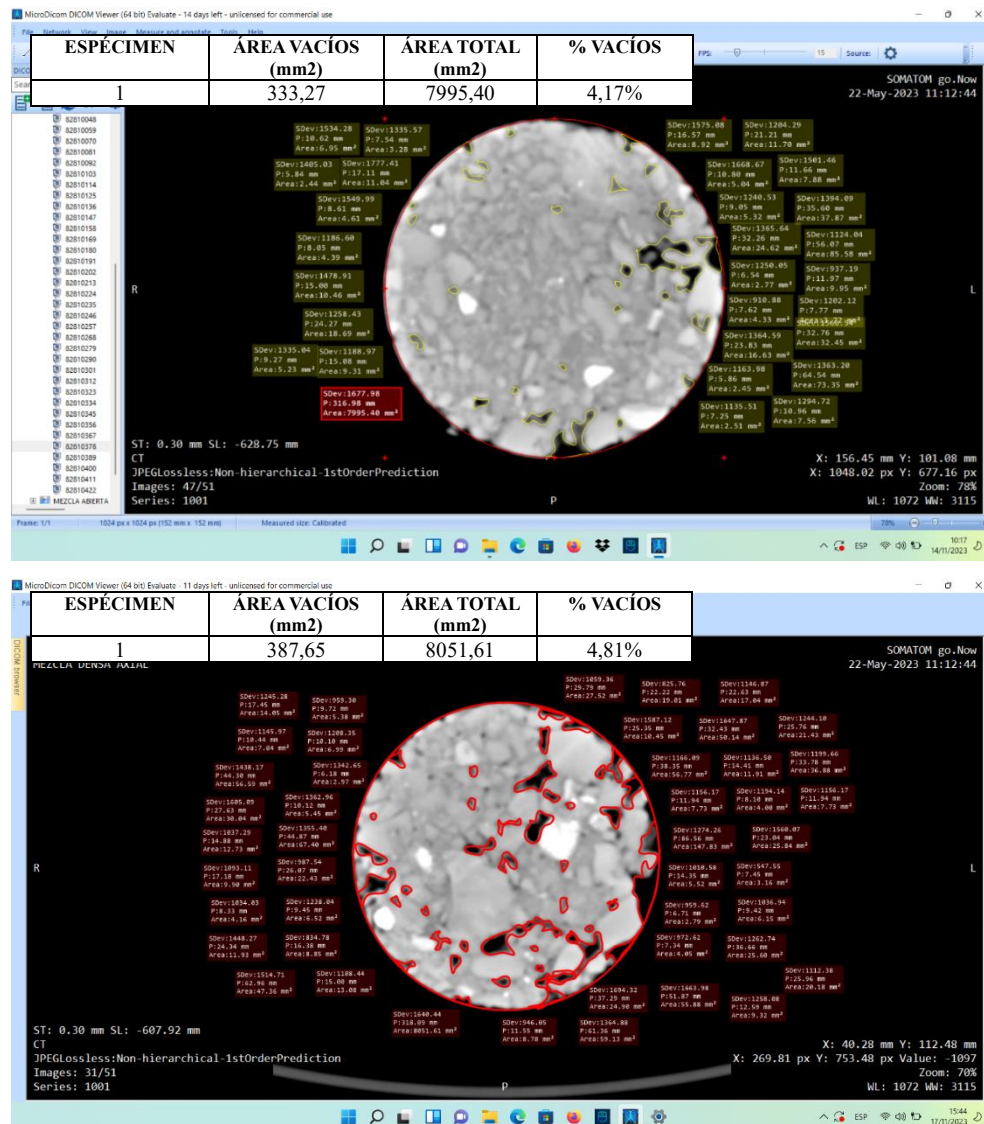
Fuente: Elaboración propia

3.10 Comparación entre cortes de observación a 4cm y 3cm.

✓ Porcentaje de vacíos

o Mezcla asfáltica densa

Figura 3.104 % Vacíos entre dos cortes de observación para una M.A. Densa

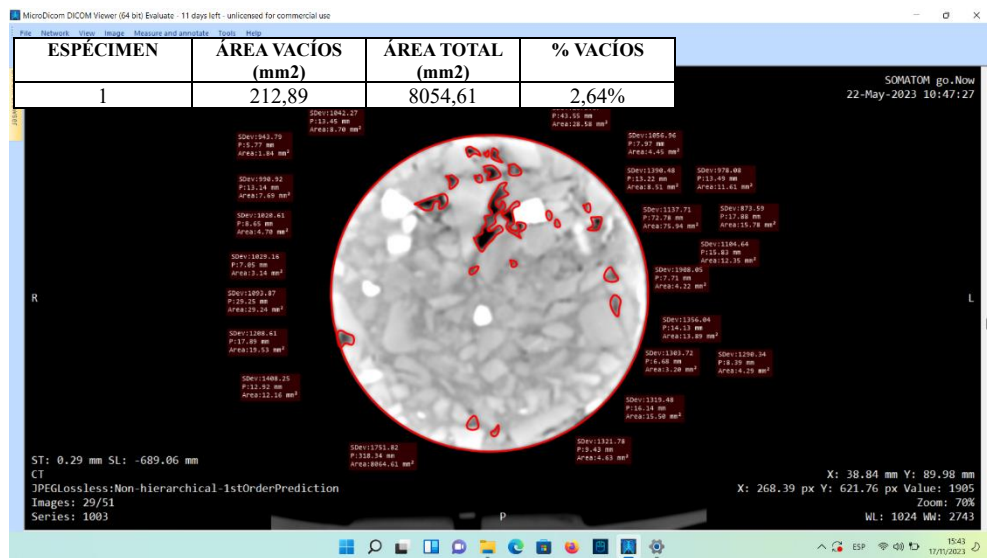
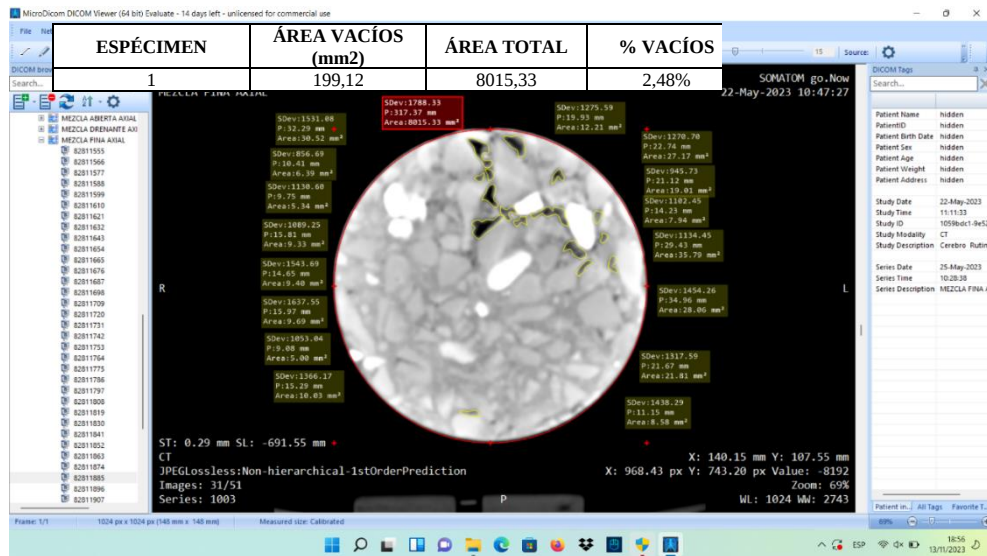


Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en las imágenes de la **figura 3.104** las cuales fueron medidas de manera manual por el programa mDicom existe una variación evidente entre ambas imágenes esto debido a que están a diferente altura por ende el porcentaje de vacíos es diferente para cada imagen.

o Mezcla asfáltica fina

Figura 3.105 % Vacíos entre dos cortes de observación para una M.A. Fina

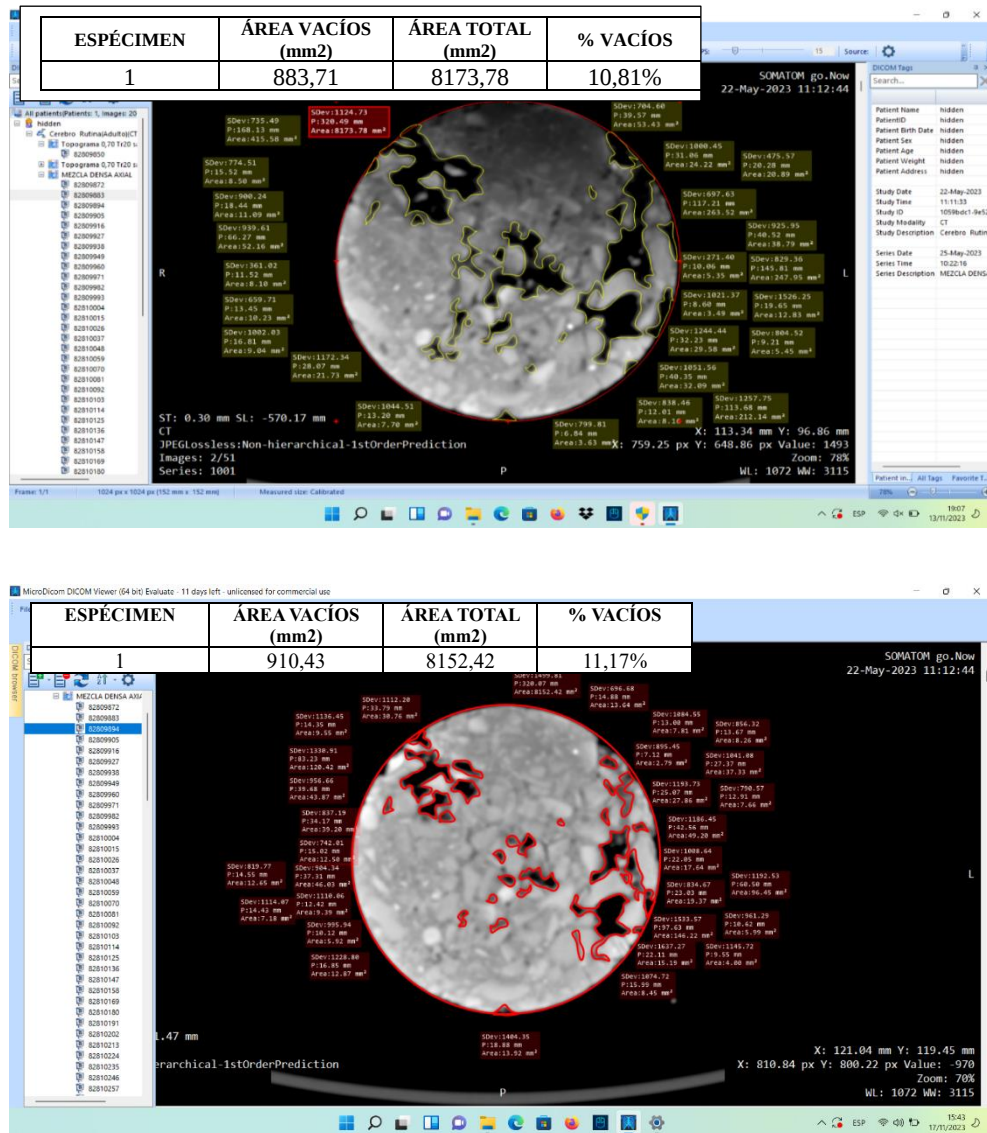


Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en las imágenes de la **figura 3.105** las cuales fueron medidas de manera manual por el programa mDicom existe una variación evidente entre ambas imágenes esto debido a que están a diferente altura por ende el porcentaje de vacíos es diferente para cada imagen.

o Mezcla asfáltica abierta

Figura 3.106 % Vacíos entre dos cortes de observación para una M.A. Abierta

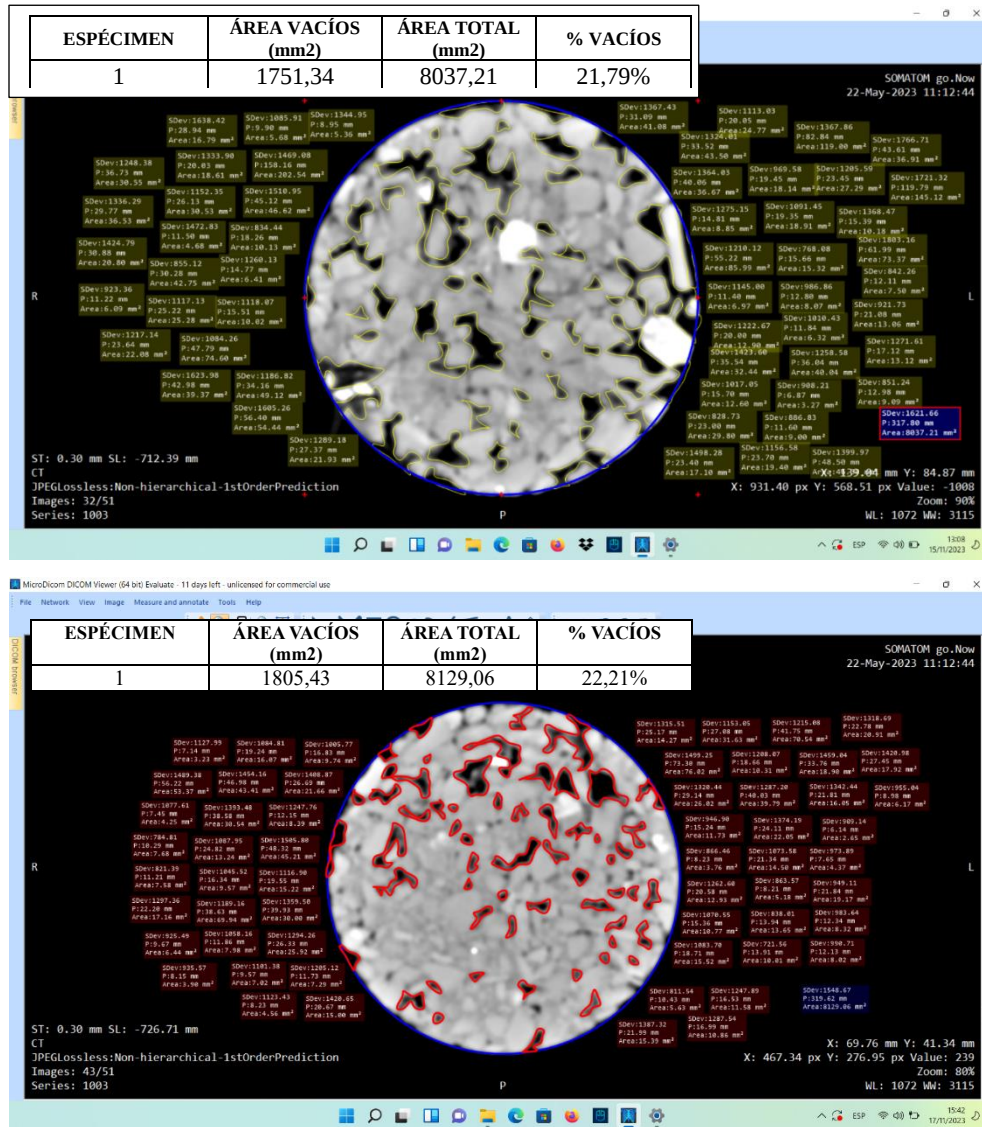


Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en las imágenes de la **figura 3.106** las cuales fueron medidas de manera manual por el programa mDicom existe una variación evidente entre ambas imágenes esto debido a que están a diferente altura por ende el porcentaje de vacíos es diferente para cada imagen.

o Mezcla asfáltica drenante

Figura 3.107 % Vacíos entre dos cortes de observación para una M.A. Drenante



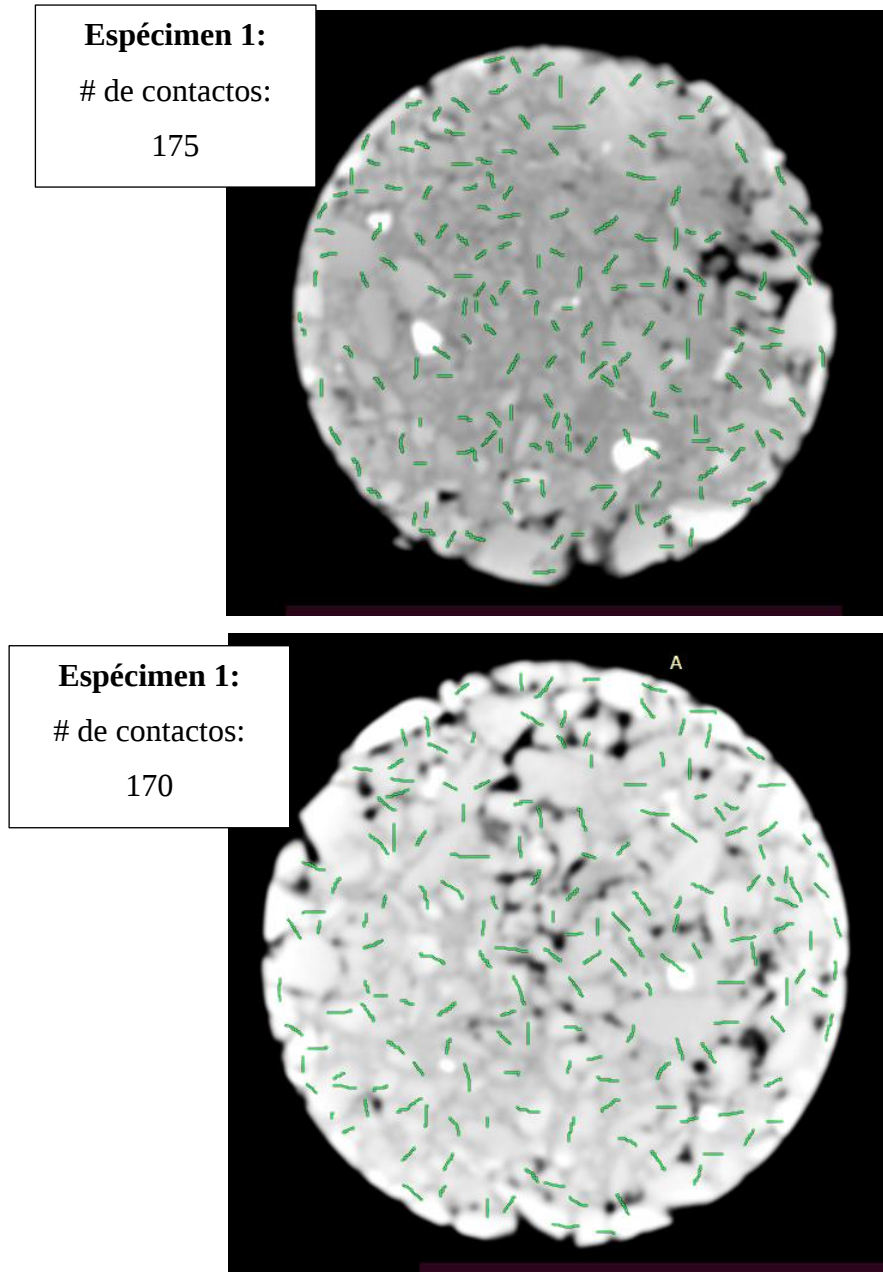
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en las imágenes de la **figura 3.107** las cuales fueron medidas de manera manual por el programa mDicom existe una variación evidente entre ambas imágenes esto debido a que están a diferente altura por ende el porcentaje de vacíos es diferente para cada imagen.

✓ **Porcentaje de vacíos**

○ **Mezcla asfáltica densa**

Figura 3.108 Contacto A-A entre dos cortes de observación para una M.A. Densa

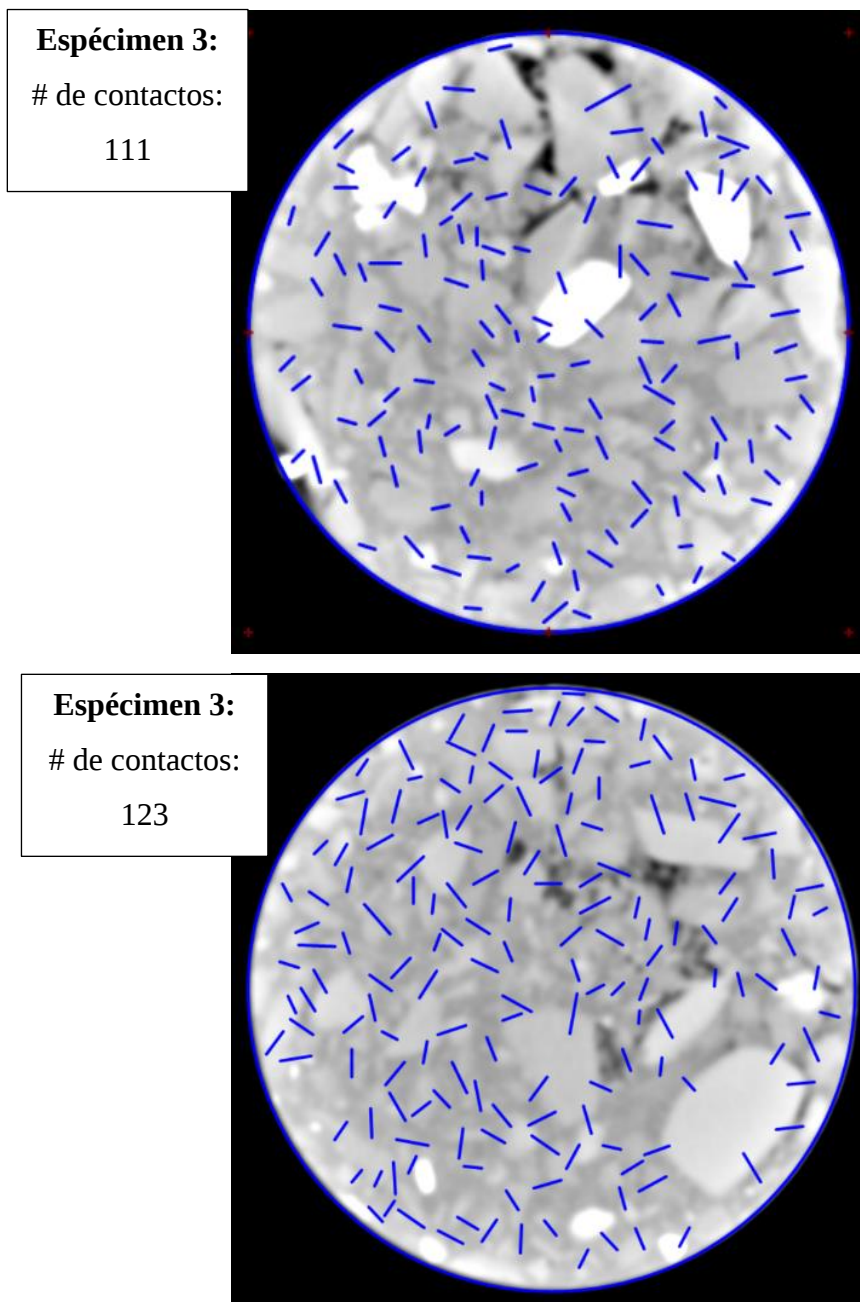


Fuente: Elaboración propia

En las imágenes de la **figura 3.108** se utilizó el programa mDicom para realizar el conteo de contacto A-A entre los agregados como se puede observar existe variación entre ambas imágenes ya que a diferente altura los agregados están distribuidos de diferente manera al igual que el porcentaje de vacíos.

o Mezcla asfáltica fina

Figura 3.109 Contacto A-A entre dos cortes de observación para una M.A. Fina

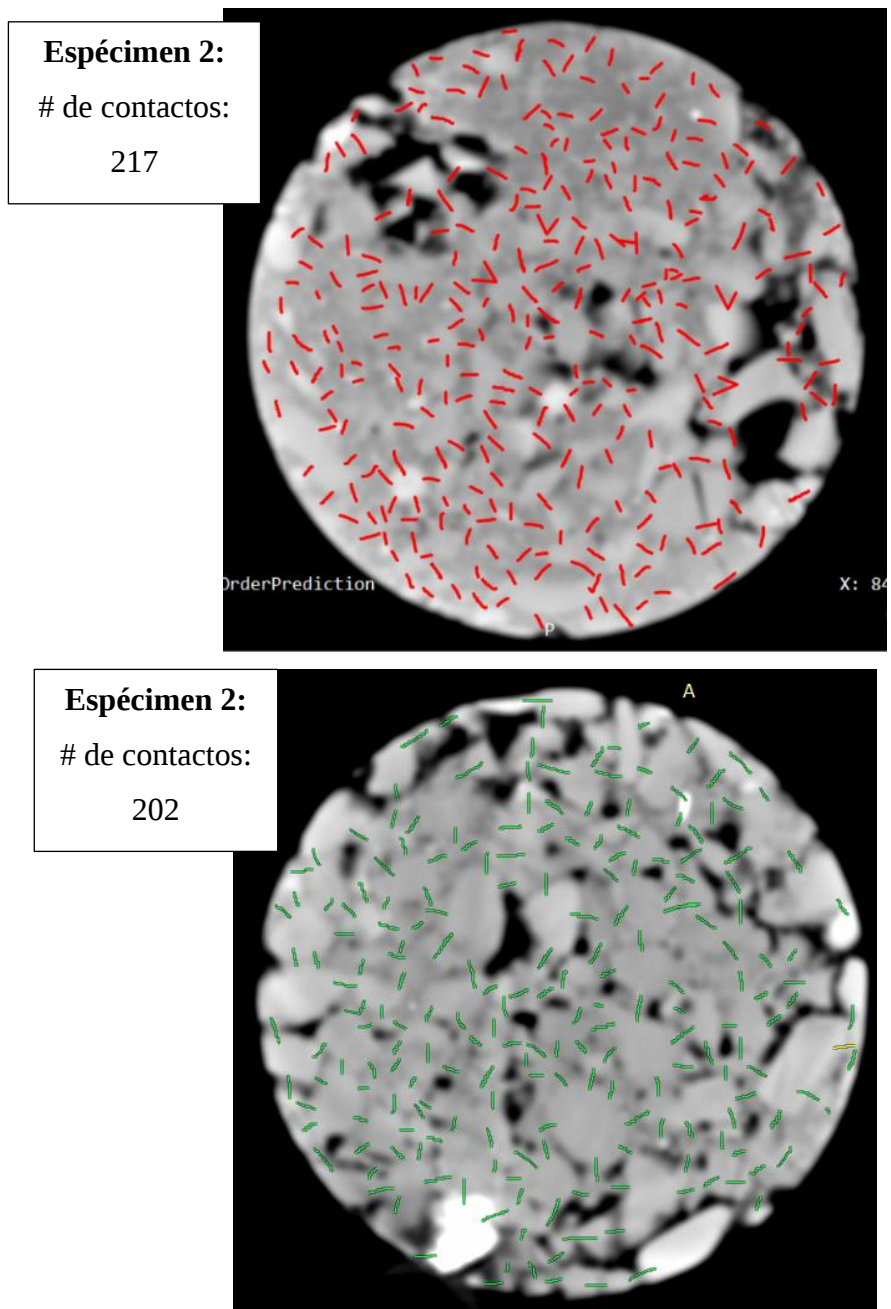


Fuente: Elaboración propia

En las imágenes de la **figura 3.109** se utilizó el programa mDicom para realizar el conteo de contacto A-A entre los agregados como se puede observar existe variación entre ambas imágenes ya que a diferente altura los agregados están distribuidos de diferente manera al igual que el porcentaje de vacíos.

o Mezcla asfáltica abierta

Figura 3.110 Contacto A-A entre dos cortes de observación para una M.A. Abierta



Fuente: Elaboración propia

En las imágenes de la **figura 3.110** se utilizó el programa mDicom para realizar el conteo de contacto A-A entre los agregados como se puede observar existe variación entre ambas imágenes ya que a diferente altura los agregados están distribuidos de diferente manera al igual que el porcentaje de vacíos.

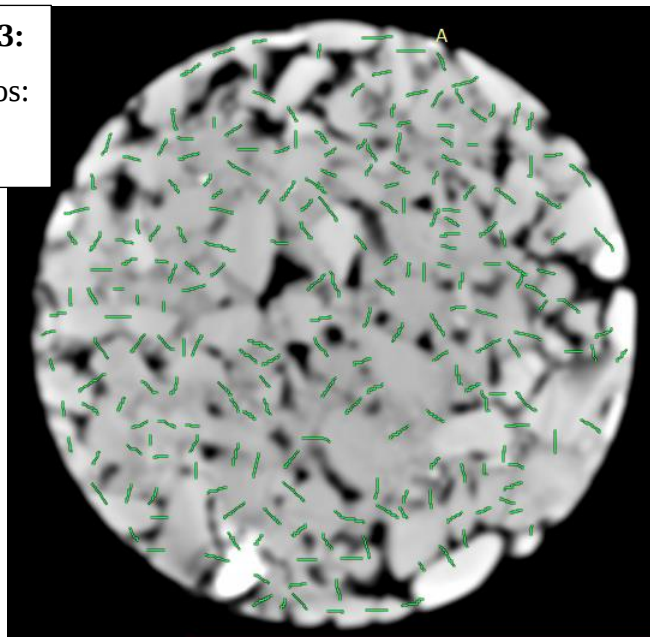
o **Mezcla asfáltica drenante**

Figura 3.111 Contacto A-A entre dos cortes para una M.A. Drenante

Espécimen 3:

de contactos:

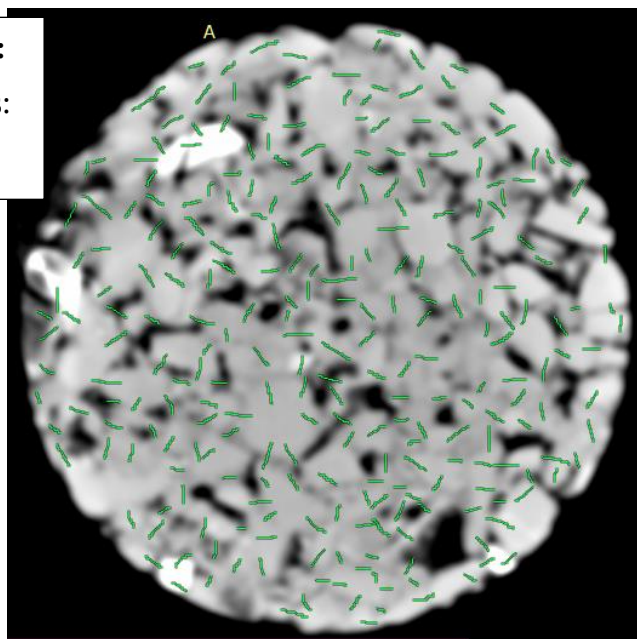
294



Espécimen 3:

de contactos:

290



Fuente: Elaboración propia

En las imágenes de la **figura 3.111** se utilizó el programa mDicom para realizar el conteo de contacto A-A entre los agregados como se puede observar existe variación entre ambas imágenes ya que a diferente altura los agregados están distribuidos de diferente manera al igual que el porcentaje de vacíos.

3.11 Resultados

✓ Contacto agregado – agregado

Se analizó las imágenes para verificar el control que se puede realizar con T.C. determinando un rango admisible para la variable admisible. Se debe depurar los datos que se alejan de valor para tener valores más precisos.

Tabla 3.64 Resultados Análisis Contacto agregado - agregado de la M.A. Densa

Media =	173,30
Desviación =	5,72
Mínimo =	165,00
Máximo =	184,00

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN:

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

RANGO: 167 < N.º DE CONTACTOS < 179

DATOS DEPURADOS:

PUNTOS (VALORES DEPURADOS)	165
	184

Tabla 3.65 Resultados Análisis Contacto agregado - agregado de la M.A. Fina

Media =	117,10
Desviación =	5,25
Mínimo =	109,00
Máximo =	128,00

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN:

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

RANGO: 112 < N.º DE CONTACTOS < 122

DATOS DEPURADOS:

PUNTOS (VALORES DEPURADOS)	109
	128

Tabla 3.66 Resultados Análisis Contacto agregado - agregado de la M.A. Abierta

Media =	217,60
Desviación =	4,21
Mínimo =	211,00
Máximo =	227,00

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN:

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

RANGO: 213 < N.º DE CONTACTOS < 222

DATOS DEPURADOS:

PUNTOS (VALORES DEPURADOS)	211
	227

Tabla 3.67 Resultados Análisis Contacto agregado - agregado de la M.A. Drenante

Media =	287,67
Desviación =	6,20
Mínimo =	276,00
Máximo =	298,00

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN:

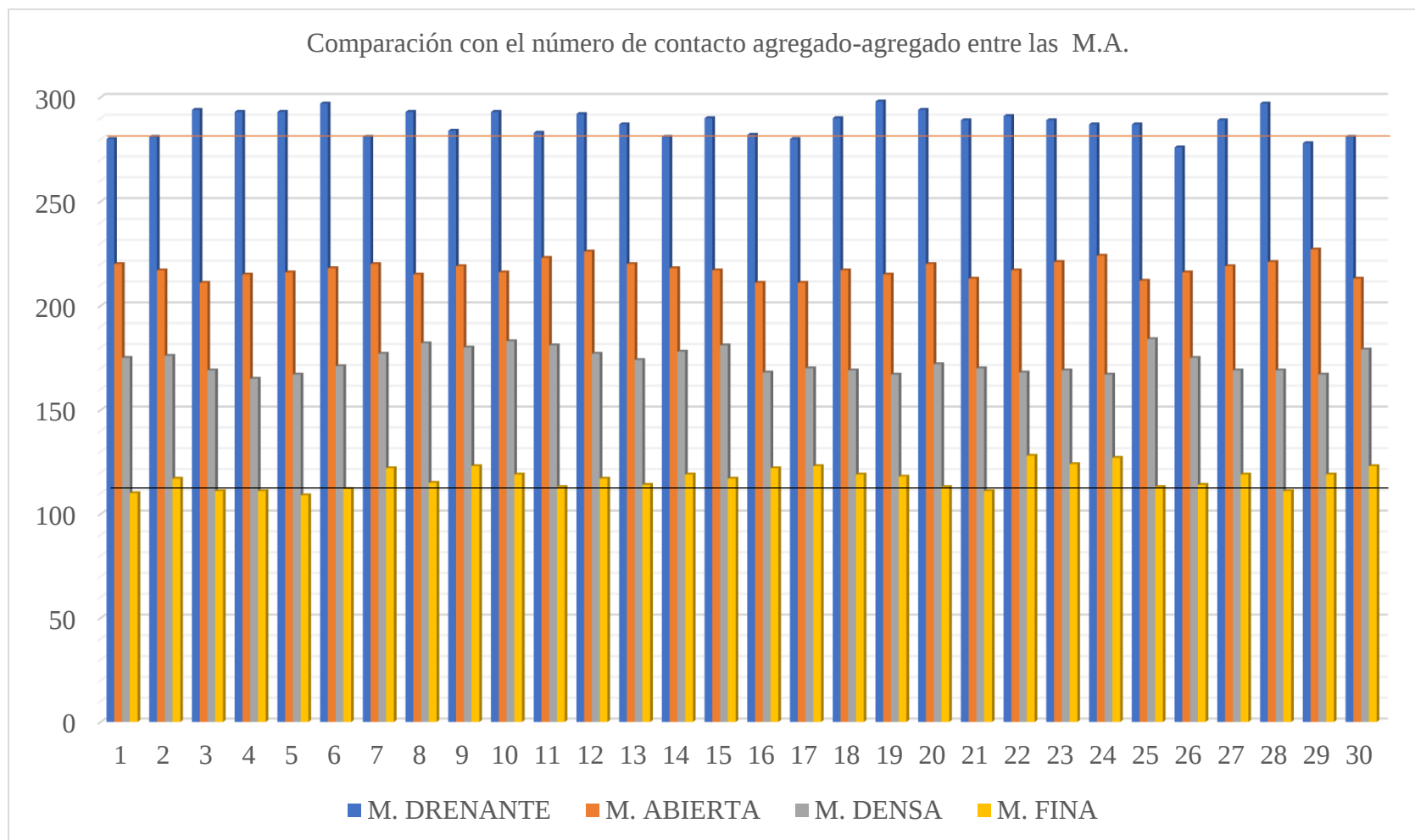
$$\overline{N^{\circ} DE CONTACTOS} \pm DESVIACIÓN ESTÁNDAR$$

RANGO: 281 < N.º DE CONTACTOS < 294

DATOS DEPURADOS:

PUNTOS (VALORES DEPURADOS)	276
	298

Figura 3.112 Comparación del número de contacto entre A-A en M.A.



Fuente: Elaboración propia

✓ **Porcentaje de vacíos**

Tabla 3.68 Resultados del Análisis de vacíos de la M.A. Densa

Media =	4,31%
Desviación =	0,11%
Mínimo =	4,10%
Máximo =	4,49%

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN:

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

RANGO: 4,2% < % **VACÍOS** < 4,42%

DATOS DEPURADOS:

% VACÍOS (VALORES DEPURADOS)	4,10%
	4,49%

Tabla 3.69 Resultados del Análisis de vacíos de la M.A. Fina

Media =	2,46%
Desviación =	0,14%
Mínimo =	2,30%
Máximo =	2,80%

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN:

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

RANGO: 2,32% < % **VACÍOS** < 2,60 %

DATOS DEPURADOS:

% VACÍOS (VALORES DEPURADOS)	2,30%
	2,80%

Tabla 3.70 Resultados del Análisis de vacíos de la M.A. Abierta

Media =	10,68%
Desviación =	0,32%
Mínimo =	10,02%
Máximo =	11,13%

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN:

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

RANGO: 10,36% < % **VACÍOS** < 11%

DATOS DEPURADOS:

% VACÍOS (VALORES DEPURADOS)	10,02%
	11,13%

Tabla 3.71 Resultados del Análisis de vacíos de la M.A. Drenante

Media =	21,67%
Desviación =	0,34%
Mínimo =	21,00%
Máximo =	22,36%

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DE DEPURACIÓN:

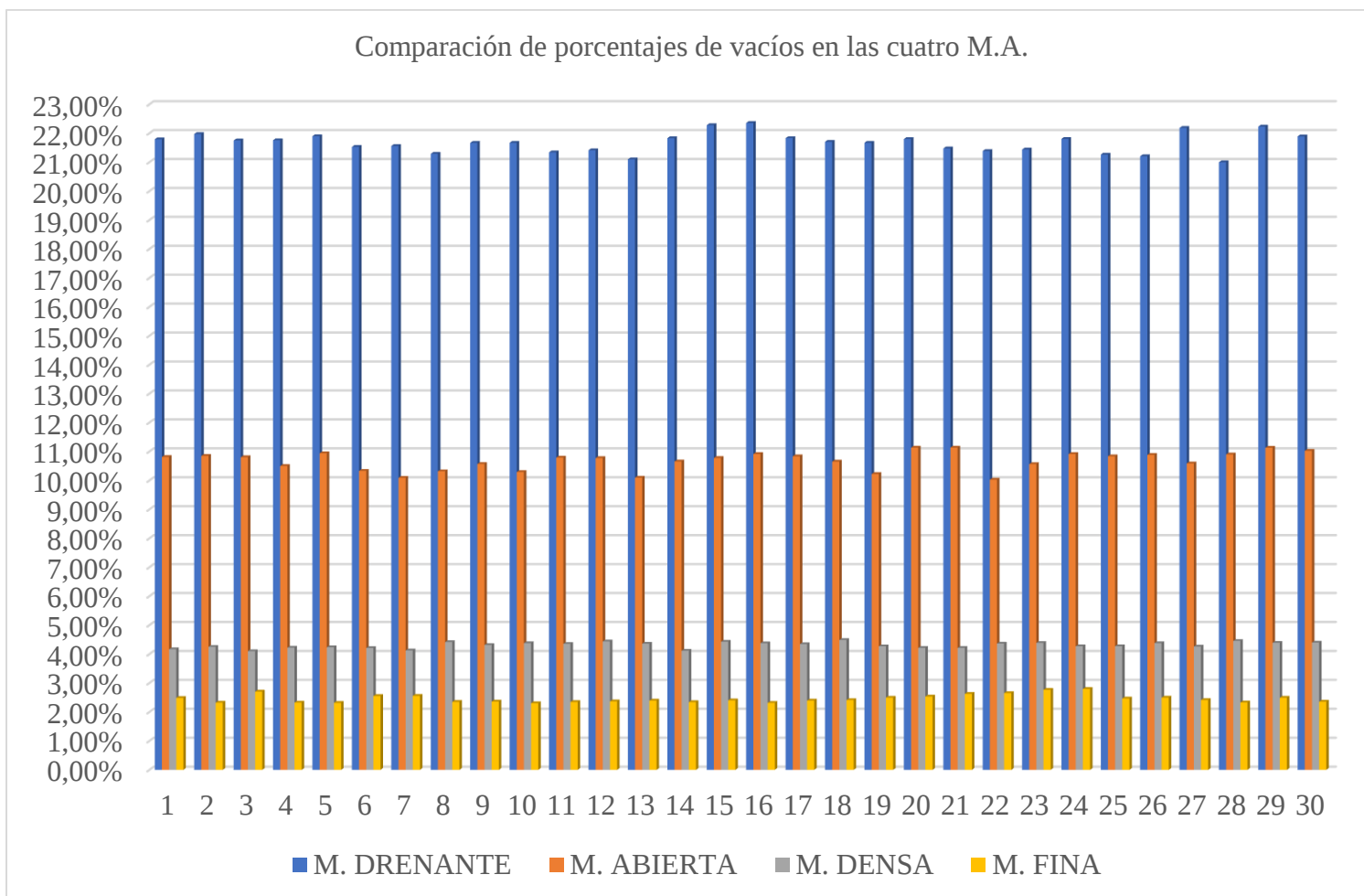
$$\overline{\% \text{ VACÍOS}} \pm \text{DESVIACIÓN ESTÁNDAR}$$

RANGO: 21,33% < % **VACÍOS** < 22,01%

DATOS DEPURADOS:

% VACÍOS (VALORES DEPURADOS)	21,00%
	22,36%

Figura 3.113 Comparación de porcentaje de vacíos entre M.A.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.72 Comparación entre mDicom y Radiant Dicom para M.A. Densa

ESPÉCIMEN	ÁREA DICOM (mm2)	ÁREA RADIANT (mm2)	ÁREA PROMEDIO (mm2)	ERROR (%) < 5%
1	333,27	330,97	332,12	0,35%
2	340,68	338,18	339,43	0,37%
3	330,32	328,12	329,22	0,33%
4	340,11	338,11	339,11	0,29%
5	341,28	338,68	339,98	0,38%
6	340,35	337,95	339,15	0,35%
7	330,67	328,47	329,57	0,33%
8	358,77	356,77	357,77	0,28%
9	350,55	348,05	349,30	0,36%
10	355,81	352,81	354,31	0,42%
11	353,74	350,54	352,14	0,45%
12	361,92	359,42	360,67	0,35%
13	348,56	344,46	346,51	0,59%
14	330,77	328,37	329,57	0,36%
15	351,68	349,58	350,63	0,30%
16	349,89	347,29	348,59	0,37%
17	347,35	342,25	344,80	0,74%
18	360,75	357,75	359,25	0,42%
19	341,43	338,53	339,98	0,43%
20	338,80	335,2	337,00	0,53%
21	337,55	331,15	334,35	0,96%
22	350,11	345,01	347,56	0,73%
23	353,68	348,88	351,28	0,68%
24	343,77	340,17	341,97	0,53%
25	341,63	336,13	338,88	0,81%
26	355,87	353,37	354,62	0,35%
27	340,56	335,56	338,06	0,74%
28	358,02	353,32	355,67	0,66%
29	350,45	345,15	347,80	0,76%
30	353,87	349,87	351,87	0,57%
Media =			344,71	0,49%
Desviación =			9,16	
Mínimo =			329,22	
Máximo =			360,67	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.73 Comparación entre mDicom y Radiant Dicom para M.A. Fina

ESPÉCIMEN	ÁREA DICOM (mm2)	ÁREA RADIANT (mm2)	ÁREA PROMEDIO (mm2)	ERROR (%) < 5%
1	199,12	197,82	198,47	0,33%
2	187,05	185,55	186,30	0,40%
3	216,69	213,49	215,09	0,74%
4	188,21	186,21	187,21	0,53%
5	186,76	184,76	185,76	0,54%
6	204,62	203,22	203,92	0,34%
7	206,31	203,11	204,71	0,78%
8	188,34	185,94	187,14	0,64%
9	188,56	186,86	187,71	0,45%
10	184,31	181,91	183,11	0,66%
11	187,24	185,04	186,14	0,59%
12	188,91	188,41	188,66	0,13%
13	191,53	188,43	189,98	0,82%
14	187,45	185,85	186,65	0,43%
15	192,21	189,11	190,66	0,81%
16	185,45	183,85	184,65	0,43%
17	191,77	188,67	190,22	0,81%
18	195,26	192,86	194,06	0,62%
19	199,94	197,94	198,94	0,50%
20	203,21	201,61	202,41	0,40%
21	210,38	207,98	209,18	0,57%
22	212,56	209,46	211,01	0,73%
23	222,61	219,81	221,21	0,63%
24	225,31	223,71	224,51	0,36%
25	198,65	196,15	197,40	0,63%
26	201,11	198,81	199,96	0,58%
27	194,32	191,32	192,82	0,78%
28	187,56	184,86	186,21	0,72%
29	200,46	198,16	199,31	0,58%
30	189,29	191,29	190,29	0,53%
Media =			196,12	0,57%
Desviación =			11,19	
Mínimo =			183,11	
Máximo =			224,51	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.74 Comparación entre mDicom y Radiant Dicom para M.A. Abierta

ESPÉCIMEN	ÁREA DICOM (mm ²)	ÁREA RADIANT (mm ²)	ÁREA PROMEDIO (mm ²)	ERROR (%) < 5%
1	883,71	875,71	879,71	0,45%
2	884,50	877,00	880,75	0,43%
3	870,00	862,70	866,35	0,42%
4	845,30	838,90	842,10	0,38%
5	889,11	884,01	886,56	0,29%
6	829,56	824,46	827,01	0,31%
7	810,21	806,21	808,21	0,25%
8	830,45	825,65	828,05	0,29%
9	850,23	845,53	847,88	0,28%
10	830,13	826,03	828,08	0,25%
11	870,25	866,65	868,45	0,21%
12	870,55	866,95	868,75	0,21%
13	812,23	809,03	810,63	0,20%
14	850,87	847,87	849,37	0,18%
15	871,67	866,67	869,17	0,29%
16	882,52	877,62	880,07	0,28%
17	870,11	863,51	866,81	0,38%
18	855,35	852,75	854,05	0,15%
19	821,10	818,60	819,85	0,15%
20	896,89	894,39	895,64	0,14%
21	890,55	888,05	889,30	0,14%
22	801,77	799,27	800,52	0,16%
23	850,43	848,03	849,23	0,14%
24	878,44	876,04	877,24	0,14%
25	872,20	865,90	869,05	0,36%
26	870,34	868,14	869,24	0,13%
27	850,11	847,91	849,01	0,13%
28	875,23	873,13	874,18	0,12%
29	895,38	893,38	894,38	0,11%
30	881,74	875,74	878,74	0,34%
Media =			857,61	0,24%
Desviación =			26,69	
Mínimo =			800,52	
Máximo =			895,64	

Fuente: Elaboración propia

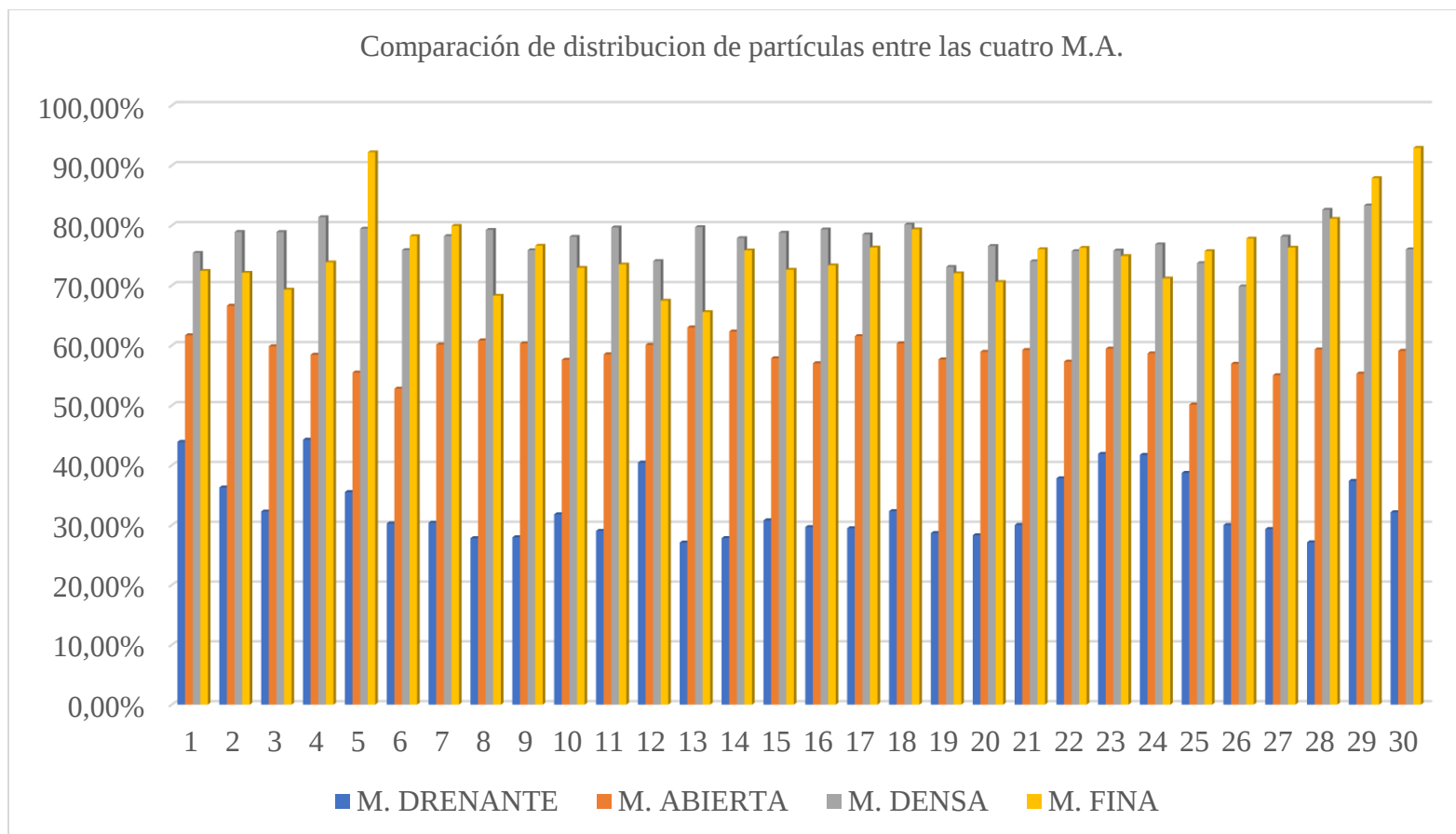
Tabla 3.75 Comparación entre mDicom y Radiant Dicom para M.A. Drenante

ESPÉCIMEN	ÁREA DICOM (mm ²)	ÁREA RADIANT (mm ²)	ÁREA PROMEDIO (mm ²)	ERROR (%) < 5%
1	1751,34	1743,34	1747,34	0,23%
2	1757,34	1749,84	1753,59	0,21%
3	1745,43	1738,13	1741,78	0,21%
4	1740,31	1733,91	1737,11	0,18%
5	1751,36	1746,26	1748,81	0,15%
6	1721,87	1716,77	1719,32	0,15%
7	1735,77	1730,77	1733,27	0,14%
8	1730,66	1725,86	1728,26	0,14%
9	1747,23	1742,53	1744,88	0,13%
10	1733,22	1729,12	1731,17	0,12%
11	1715,15	1711,55	1713,35	0,11%
12	1712,45	1708,85	1710,65	0,11%
13	1687,34	1684,14	1685,74	0,09%
14	1745,88	1742,88	1744,38	0,09%
15	1781,87	1778,87	1780,37	0,08%
16	1788,62	1785,72	1787,17	0,08%
17	1749,91	1747,31	1748,61	0,07%
18	1735,83	1733,23	1734,53	0,07%
19	1733,22	1730,72	1731,97	0,07%
20	1743,66	1741,16	1742,41	0,07%
21	1717,60	1715,10	1716,35	0,07%
22	1718,90	1716,40	1717,65	0,07%
23	1720,20	1717,80	1719,00	0,07%
24	1755,34	1752,94	1754,14	0,07%
25	1722,80	1720,50	1721,65	0,07%
26	1724,11	1721,91	1723,01	0,06%
27	1774,33	1772,13	1773,23	0,06%
28	1687,59	1685,49	1686,54	0,06%
29	1789,71	1787,71	1788,71	0,06%
30	1750,88	1748,88	1749,88	0,06%
Media =			1737,16	0,11%
Desviación =			25,00	
Mínimo =			1685,74	
Máximo =			1788,71	

Fuente: Elaboración propia

✓ **Distribucion de partículas**

Figura 3.114 Comparación de la distribución de partículas en las M.A.



Fuente: Elaboración propia

3.12 Análisis de resultados

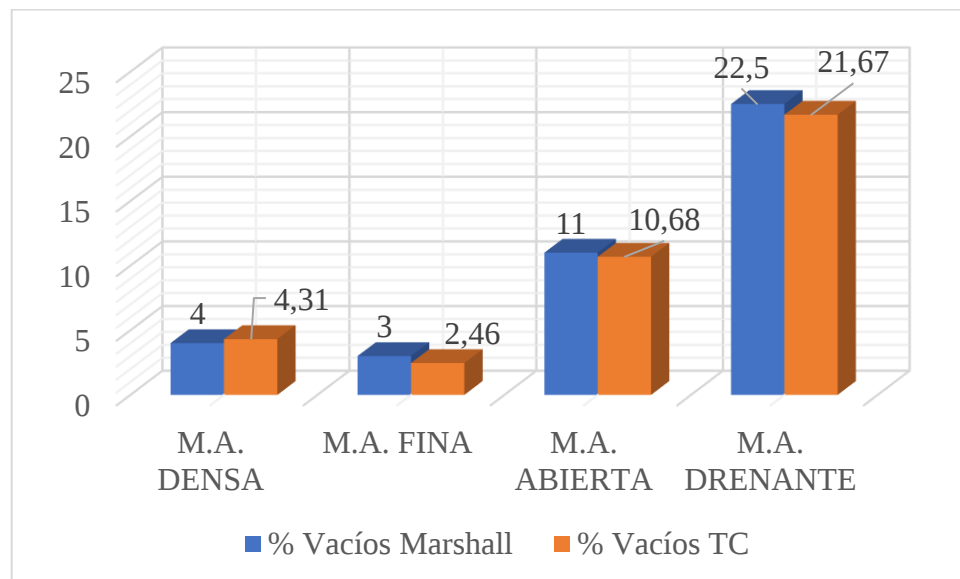
3.12.1 Porcentaje de vacíos

El porcentaje de vacíos debe encontrarse dentro de los rangos establecidos para cada tipo de mezcla asfáltica estudiada. En el caso de la mezcla densa entre 3% y 6%, para una mezcla asfáltica fina debe ser menor al 5%, para una mezcla asfáltica abierta debe estar entre los rangos de 10% al 12% y para una mezcla drenante los vacíos deben ser superior al 20%.

Los valores de porcentajes de vacíos 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, como por la metodología Marshall.

Figura 3.115 Porcentaje de Vacíos para cada mezcla asfáltica estudiada



Fuente: Elaboración propia

Los valores obtenidos por medio de TC no sobrepasan el 5% de diferencia con respecto al valor Marshall diseño, por lo que se pueden adoptar como valores admisibles, obteniendo un margen de confianza del 95%.

Los porcentajes de vacíos obtenidos mediante TC, determinan valores dentro del rango especificado por las normas utilizadas para el diseño de mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas densas tienen un valor máximo de 4,49% de vacíos comparado con el calculado en laboratorio que es de 4% significa que no siempre en el campo saldrá como se dosificó, y sacando un promedio el 100% está en el rango donde cumple con el porcentaje de vacíos.

Las mezclas asfálticas finas tienen un máximo de vacíos cerca del 2,80% comparado con el calculado en laboratorio que es de 3% nos dice que el 100% de las probetas esta con un porcentaje inferior al 3%, que corresponde a una mezcla asfáltica fina.

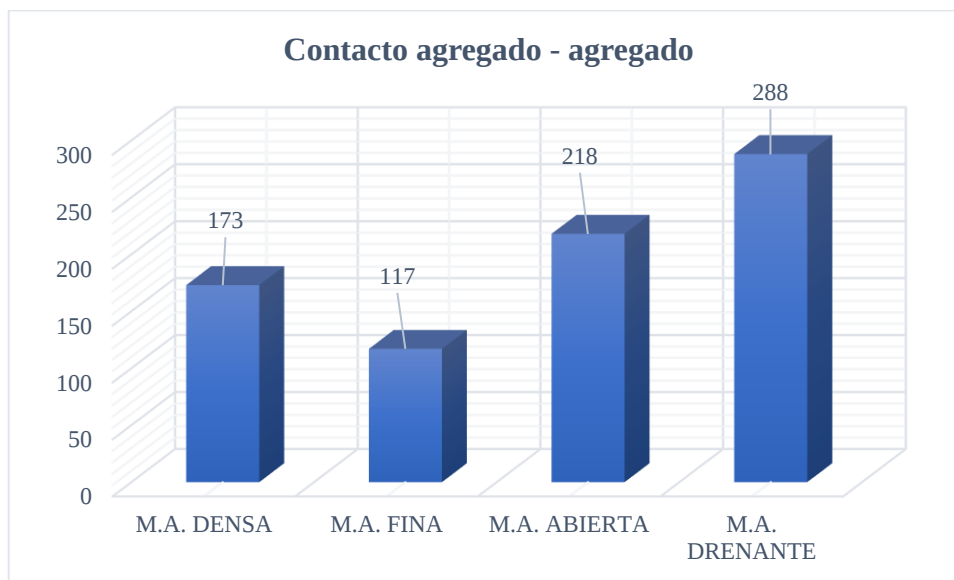
Las mezclas asfálticas abiertas tienen un máximo de vacíos cerca del 11,13% comparado con el calculado en laboratorio que es de 11% lo que indica que entre el 10 y el 11% se encuentran 26 probetas que son el 87% de las probetas referidas al diseño en laboratorio y el 13% son para un porcentaje superior de vacíos.

Las mezclas asfálticas drenantes tienen un máximo de vacíos cerca del 22,36 % comparado con el calculado en laboratorio que es de 22,5% lo que significa que entre el porcentaje de vacíos en los especímenes varia al establecido por norma.

3.12.2 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.

Figura 3.116 Puntos de Contacto en las mezclas analizadas



Fuente: Elaboración propia

Una vez analizados los valores de puntos de contacto determinados mediante las TC, se obtuvieron los valores medios de:

- Para el banco de datos de M.A. Densas, 173 puntos de contacto.
- Para el banco de datos M.A. Finas, 117 puntos de contacto.
- Para el banco de datos M.A. Abiertas, 218 puntos de contacto.
- Para el banco de datos M.A. Drenantes, 288 puntos de contacto.

El contacto agregado- agregado que es la unión de partícula a partícula tiene una variación en las mezclas asfálticas abiertas alcanzando una cantidad promedio de 173 siendo uniforme en ese contacto agregado-agregado mientras que las densas tienen un menor contacto agregado- agregado debido a que presenta una mejor distribución de sus partículas lo que provoca que no exista contacto debido a las partículas pequeñas.

El contacto en las mezclas asfálticas drenantes tiene un mayor contacto debido a que predomina el material grueso lo que provoca que la cantidad de partículas sea hasta 288 siendo uniforme su conteo en los 30 especímenes.

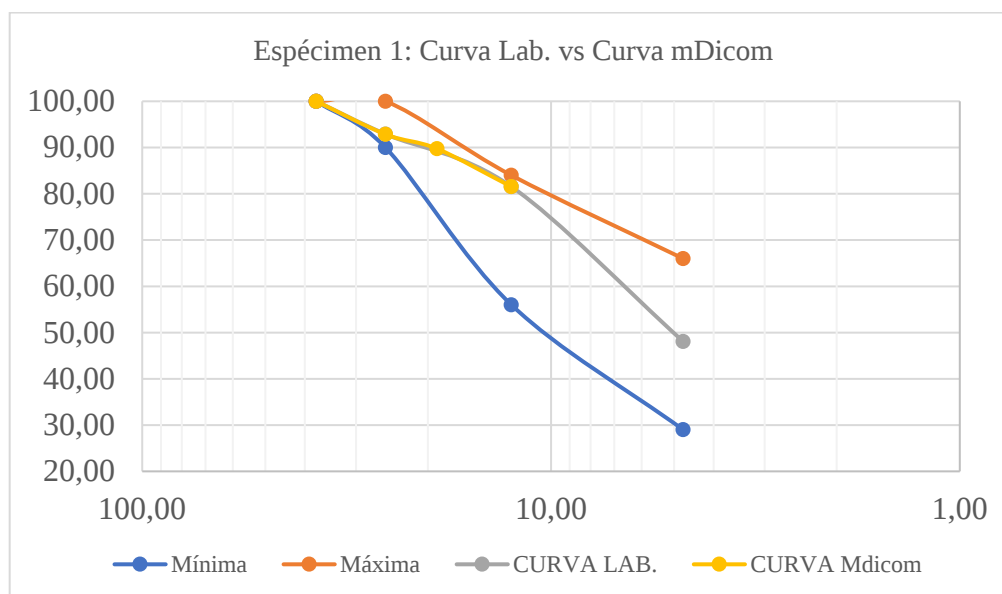
En las mezclas finas el contacto es mucho menor debido a que existen partículas pequeñas entre los agregados lo que dificulta su contacto entre agregados, y tiene una cantidad de 128 contactos la cual es uniforme entre los 30 especímenes estudiados.

En las mezclas densas el contacto entre agregado - agregado es de 184 esto debido a que posee un poco más de materiales grueso a diferencia de las mezclas asfálticas finas.

3.12.3 Caracterización de partículas

Para la caracterización se debe considerar una comparación entre la curva de diseño granulométrico y las bandas de limitación obtenida en laboratorio y comparar con la curva obtenida por medición con el programa mDicom de esta manera se obtendrá el grado de certidumbre que posee lo medido con lo obtenido en laboratorio.

Figura 3.117 Resultado de caracterización para M.A. Densa



Fuente: Elaboración propia

Se puede evidenciar en el gráfico como la curva mDicom sigue la misma trayectoria de la curva de laboratorio y se encuentra dentro de las bandas establecidas por norma lo que indica una certidumbre inferior al 5% lo que indica una confianza superior al 95%.

Tabla 3.76 Cálculo del grado de incertumbre para una M.A. Densa

Tamiz	Tamaño (mm)	Especificaciones			% Ret. Lab.	% Ret. Medido	CURVA Medido	Δ (grado de incertidumbre) < 5%
		ASTM D3515						
		Mín	CURVA	Máx.				
1½"	37,5	100	100,00	100	0,00	0,00	100,00	0,000
1"	25,4	90	92,90	100	7,10	7,14	92,86	0,039
¾"	19,0	-	89,75	-	10,25	10,26	89,74	0,011
½"	12,5	56	81,55	84	18,45	18,45	81,55	0,001

Fuente: Elaboración propia

En la caracterización de las mezclas asfálticas densas se puede evidenciar que el diseño granulométrico estudiado en laboratorio nos da los valores correspondientes a los agregados desde 1" a ½" donde el porcentaje que fue utilizado para la dosificación no varía por mucho con lo que se visualizó en las tomografías axiales por ende cuenta con un grado de incertidumbre inferior al 5% lo que nos genera una validez superior al 95%.

Consecuentemente en las mezclas asfálticas finas su porcentaje de retenido de las partículas de 1” a ½” son similares a las obtenidas por el diseño granulométrico con una ligera variación pero que esta próximo al valor lo que indica que la dosificación se realizó de manera correcta con una certidumbre inferior al 5% lo que indica una validez superior al 95%.

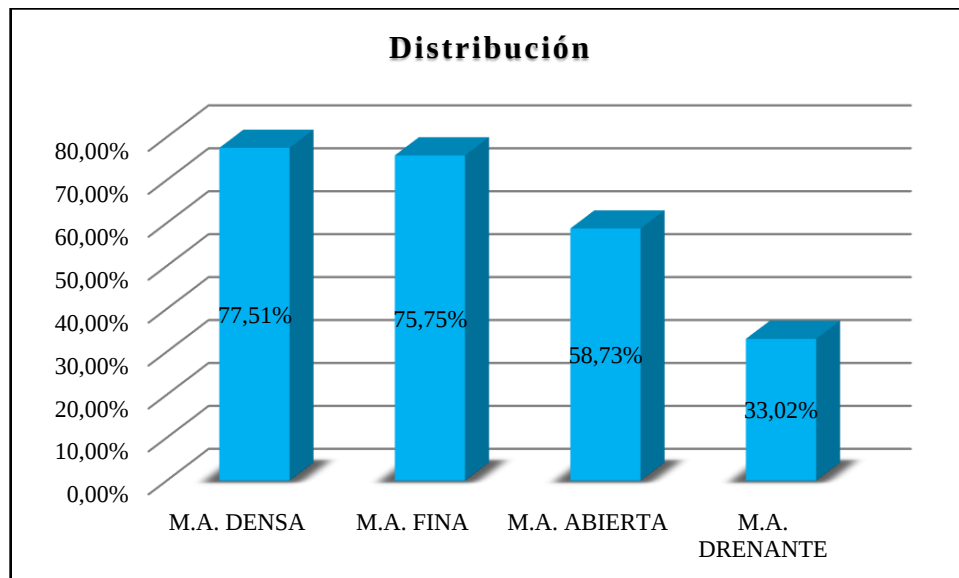
En la caracterización de las mezclas asfálticas abiertas se comparó que los resultados de sus agregados estudiados para comparación de 1” a ½” coinciden con el diseño que se realizó en antes de la dosificación, si existe la ligera variación, pero se encuentra en el rango que permite la norma que es ser inferior al 5% con un nivel de confianza superior al 95%.

Y por último en la caracterización de las mezclas asfálticas drenantes donde se trabajó con gravilla de 3/8” hasta ¼” esto debido a la apreciación de la imagen lo que dificulto el estudio de los demás tamaños de gravilla nos indica que el porcentaje de 3/8” y ¼” son aproximados a los valores de su diseño granulométrico para este tipo de mezcla con una validez superior al 95% ya que su certidumbre esta entre los rangos establecidos.

3.12.4 Distribución de partículas

La distribucion de partículas se calculará con una medición del área libre de vacíos donde los agregados estén distribuidos de la mejor manera.

Figura 3.118 Resultado de distribucion de partículas de las mezclas estudiadas



Fuente: Elaboración propia

Se muestra que las mezclas finas que tienen partículas pequeñas tienen una distribución uniforme en toda el área de la muestra que alcanza al 75,75% de distribución del agregado debido a que posee menor porcentaje de vacíos.

Se demuestra que las mezclas densas que tienen partículas considerables tienen una distribución casi uniforme pero no homogénea en el área de la muestra y esta alcanza al 77,51% de distribución del agregado.

Las mezclas abiertas tienen partículas medias las cuales tienen una distribución poco uniforme en toda el área de la muestra que alcanza al 58,73% de distribución del agregado.

Por último, las mezclas drenantes que tienen partículas gruesas tienen una distribución irregular en toda el área de la muestra lo que provoca poca distribución de sus agregados debido a que habrá más porcentaje de vacíos dentro del área esta distribución alcanza el 33,02% de la distribución del agregado.

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Los valores de porcentaje de vacíos obtenidos por medio de TC no sobrepasan el 5% de diferencia con respecto al valor Marshall diseño, por lo que se pueden adoptar como valores admisibles, obteniendo un margen de confianza del 95%.

La que mayor porcentaje de vacíos muestra la tomografía es para las mezclas drenantes con porcentajes desde 21% hasta 22,36% en las 30 imágenes estudiadas.

La mezcla asfáltica que posee menor porcentaje de vacíos son las mezclas asfálticas finas con un 2,30% y 2,80% en campo lo que indica que, aunque en laboratorio se diseñe al 3% siempre existirá la ligera variación entre ambos diseños.

Las imágenes presentan una desviación de 0,11%, por lo que los valores admisibles para el porcentaje de vacíos son aquellos que se encuentren entre $4,31\% \pm 0,11\%$. Para una mezcla asfáltica densa. Los valores que se encuentren fuera del rango establecido serán depurados para obtener resultados más exactos para cada mezcla asfáltica.

Las imágenes presentan una desviación de 0,14%, por lo que los valores admisibles para el porcentaje de vacíos son aquellos que se encuentren entre $2,46\% \pm 0,14\%$. Para una mezcla asfáltica fina. Los valores que se encuentren fuera del rango establecido serán depurados para obtener resultados más exactos para cada mezcla asfáltica.

Las imágenes presentan una desviación de 0,32%, por lo que los valores admisibles para el porcentaje de vacíos son aquellos que se encuentren entre $10,68\% \pm 0,32\%$. Para una mezcla asfáltica abierta. Los valores que se encuentren fuera del rango establecido serán depurados para obtener resultados más exactos para cada mezcla asfáltica.

Las imágenes presentan una desviación de 0,34%, por lo que los valores admisibles para el porcentaje de vacíos son aquellos que se encuentren entre $21,67\% \pm 0,34\%$. Para una mezcla asfáltica drenante. Los valores que se encuentren fuera del rango establecido serán depurados para obtener resultados más exactos para cada mezcla asfáltica.

Se muestra un contacto de agregado- agregado en las imágenes estudiadas con valores de 109 a 128 contactos en las mezclas asfálticas finas eso debido a que las partículas están

mejor distribuidas, lo que provoca un menor contacto. Por ende, estas presentan una desviación de 5,25 por lo que los valores admisibles para N° de contactos son aquellos que se encuentren entre $117 \pm 5,25$. Los valores que se encuentren fuera del rango establecido serán depurados para obtener resultados más exactos para cada mezcla asfáltica.

Se demuestra que la mezcla asfáltica que mayor contacto agregado- agregado posee es la mezcla drenante debido a su baja distribución de partículas pequeñas lo que provoca que el agregado de tamaño mayor tenga contacto con otros agregados esta cantidad de contactos esta entre 276 y 298 contactos, para esto solo podemos comparar con la mezcla convencional la mezcla densa la cual posee simplemente 227 y 211 contactos debido a que tiene mejor distribución de partículas frente a las mezclas asfálticas drenantes.

En la caracterización de las mezclas asfálticas se puede notar que el área promedio de los agregados gruesos de 1" en las mezclas asfálticas densas esta entre 570 a 590 mm² lo que presenta un porcentaje del 7,10% que es aproximado al 7,10% de material retenido de este tamaño obtenido del diseño granulométrico para una M.A. Densa.

Para la caracterización de una mezcla asfáltica fina con agregados de 1" su área de agregado es de 570mm² lo que representa el 7,11% de agregado de 1" el cual es aproximado al valor de 7,10% resultante del diseño granulométrico para este tipo de mezcla fina.

En la caracterización de mezclas abiertas se demuestra mediante las tomografías axiales que los agregados de 1" cumplen con el área que especifico el diseño granulométrico en la elaboración de esta mezcla asfáltica es de aproximadamente 500,45 mm² que representa el 6,22% de la muestra y en el diseño da como resultado 6,25% lo que indica una validez de los datos superior al 95%.

Por último, en la caracterización de mezclas asfálticas drenantes donde solo se utilizó gravilla y se realizó la comparación de dos tamices esto debido a la apreciación de las imágenes nos indica que el área de agregado para 3/8" es de 848,00 mm² que representa el 10,60% de agregado y en las planillas de diseño indica que es el 10,61% como se evidencio en los resultados nos indica un grado de incertidumbre inferior al 5% lo que indica una confianza superior al 95%.

Se demuestra que la mezcla asfáltica que posee mejor distribución de partículas es la mezcla asfáltica fina porque posee una distribución uniforme en toda el área de la muestra que alcanza un valor de 75,75% de distribución del agregado.

Las tomografías axiales comprueban que la mezcla asfáltica que tiene poca distribución de partículas es la mezcla asfáltica drenante la cual alcanza un valor de 33,02% del área de la muestra.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda trabajar solo con las tomografías que contengan mejor visibilidad para obtener resultados más precisos.

Tener un solo programa que trabaje exclusivamente con tomografías axiales y que haga el conteo de partículas con una mayor precisión.

Se debe practicar y perfeccionar el uso de herramientas digitales como el Software Syngo Via, ya que el avance cualitativo es relevante; además se recomienda profundizar en la investigación de más variables que permitan hacer comparaciones y establecer mayores patrones de comportamiento para el control de calidad de las mezclas asfálticas.

Se debe buscar o generar guías e incluso normativas para la evaluación micro y macro estructural de mezclas asfálticas mediante tomografía axial, que permitan generar criterios de aceptación para ser utilizados en los proyectos específicamente viales.

