



Facultad de Ciencias Químicas BUAP

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**

***“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA  
TEMPERATURA SOBRE EL DISEÑO DE MEZCLAS  
ASFÁLTICAS MEDIANTE EL USO DE ASFALTOS  
NORMALES Y MODIFICADOS USANDO MÉTODOS  
CONVENCIONALES Y TOMOGRAFÍA  
COMPUTARIZADA.”***

**T E S I S**

Que para obtener el Título de:  
**LICENCIADA EN QUÍMICA**

Presenta:

**HANDY BERENICE ARMENTA RIVERA**

Director de Tesis:

**DR. JORGE RAÚL CERNA CORTEZ**

H. Puebla de Z. Agosto 2025

## DEDICATORIA

*A mi padre Dios, creador de todas las cosas, que me ha dado fuerza y valor para continuar cuando a punto de caer he estado; porque cuando necesito algo, ya lo sabes; cuando te pido algo, me escuchas; y mi fe en ti, obra a mi favor.*

*A mis padres, Anel y Miguel, quienes estuvieron siempre a mi lado en los días y noches más difíciles, durante mis horas de estudio. Por su constante estímulo y enseñarme que la perseverancia y el esfuerzo son el camino para lograr mis objetivos.*

*A mis hermanos, Kevin y Yahel, por ser tan increíbles y únicos. Sin duda son mi mejor regalo.*

*Al gran amor de mi vida, Emiliano Daniel Ahedo González porque con su amor, paciencia y consejos, me ha inspirado.*

*A mi director de tesis, el Dr. Jorge Raúl Cerna Cortez, por su generosidad al compartirme su experiencia científica, y brindarme la oportunidad para llevar a cabo esta investigación.*

*A mi comisión revisora: Dr. Luis Ángel Aguilar Carrasco, Dr. César Márquez Beltrán y la M.C. Gabriela Esquina Arenas.*

*Al Ing. Saúl Rivera González, del Laboratorio de Pavimentos (UDLAP), por brindarme su apoyo incondicional en el desarrollo de las pruebas de laboratorio, respectivas a Ingeniería Civil.*

*Al Q. Luis Alberto Cruz, por ser un parteaguas en el desarrollo de este proyecto; por aportarme los asfaltos necesarios para el proceso de compactación.*

*A mis docentes, por su sabiduría compartida, su guía, su disposición a orientarme; por el ambiente ameno creado en el aula, su paciencia y perseverancia.*

*A mis compañeros de viaje, que se han convertido en grandes amigos.*

*A todas las personas que contribuyeron para el desarrollo de este proyecto.*

*¡MIL GRACIAS!!!*

## CONTENIDO

DEDICATORIA .....	.....
CONTENIDO .....	II
LISTA DE ABREVIATURAS .....	III
RESUMEN .....	1
<b><u>1.</u> INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>4</b>
HIPÓTESIS .....	8
OBJETIVOS .....	10
<b><u>2.</u> MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>12</b>
ANTECEDENTES.....	12
<i>GENERALIDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS</i> .....	12
<i>MEZCLAS ASFÁLTICAS EN MÉXICO</i> .....	14
<i>DISEÑO Y COMPACTACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS</i> .....	15
<i>NIVELES DE DISEÑO FINAL</i> .....	17
<i>SELECCIÓN DE LAS MUESTRAS DE MATERIAL</i> .....	17
<i>EVALUACIÓN DE LA CURVA DE VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (VMA)</i> .....	18
<i>EFFECTO DEL NIVEL DE COMPACTACIÓN:</i> .....	18
<i>USO DE LA TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA</i> .....	19
<i>PROCESAMIENTO DIGITAL DEL ESPÉCIMEN</i> .....	20
<i>RECONSTRUCCIÓN DEL ESPÉCIMEN ANALIZADO</i> .....	21
<i>PORCENTAJE DE VACÍOS DE AIRE</i> .....	22
<i>VENTAJAS DE LA CT COMO TÉCNICA NO DESTRUCTIVA</i> .....	23
<b><u>3.</u> METODOLOGÍA</b> .....	<b>26</b>
3.1 MÉTODOS CONVENCIONALES.....	26
<i>ETAPA 1: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</i> .....	26
<i>ETAPA 2: PROCESO DE MEZCLADO</i> .....	28
<i>ETAPA 3: PROCESO DE COMPACTACIÓN</i> .....	29
3.2 MÉTODO TOMOGRÁFICO .....	30
3.2.1 ANÁLISIS TOMOGRÁFICO.....	30
<b><u>4.</u> RESULTADOS</b> .....	<b>33</b>
MÉTODOS CONVENCIONALES .....	33
ANÁLISIS TOMOGRÁFICO.....	34
<b><u>5.</u> CONCLUSIONES</b> .....	<b>45</b>
<b><u>6.</u> REFERENCIAS</b> .....	<b>48</b>
<b><u>7.</u> LISTA DE ILUSTRACIONES</b> .....	<b>50</b>
<b><u>8.</u> GLOSARIO</b> .....	<b>51</b>
<b><u>9.</u> ANEXOS</b> .....	<b>55</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABREVIATURA	DEFINICIÓN
• AC-20	• Asfalto Normal.
• AIMS	• Sistema de Imágenes de Agregados.
• AMAAC	• Asociación Mexicana de Asfalto A.C.
• AP	• Asfalto Poroso.
• C <sub>74</sub> H <sub>87</sub> NS <sub>20</sub>	• Estructura Química de los Asfaltenos.
• CAT	• Tomografía Axial Computarizada.
• CT	• Tomografía Computarizada.
• IMT	• Instituto Mexicano del Transporte.
• kV	• Kilovoltios.
• MC-1	• Mezcla Caliente 1.
• MC-2	• Mezcla Caliente 2.
• MPa	• MegaPascal
• MT-1	• Mezcla Tibia 1.
• MT-2	• Mezcla Tibia 2
• PG	• Grado de desempeño ( <i>En inglés, Performance-Grade</i> ).
• TIFF	• Formato de Archivo de Imágenes con Etiquetas.
• S.A.R.A	• Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos.

• <b>SUPERPAVE</b>	• <i>(En inglés)</i> Superior Performing Asphalt Pavements.
• <b>VMA</b>	• Vacíos en el Agregado Mineral.

## RESUMEN

**E**n esta tesis se estudian los conceptos relacionados con la compactación de mezclas asfálticas, las temperaturas que rigen este proceso y las técnicas de evaluación teóricas y experimentales. El asfalto, una sustancia de color marrón oscuro a negro, es altamente viscoso y termoplástico, es decir, se ablanda y fluye a altas temperaturas y se endurece a bajas temperaturas. Constituye la fracción más pesada del petróleo crudo, y al mezclarse con arena y grava, forma pavimento asfáltico. Mediante métodos químicos como la destilación fraccionada, se separan los componentes del asfalto, clasificándolo en cuatro grupos orgánicos bien definidos: saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos, conocidos como SARA.

Este estudio incluye el análisis del contenido, tamaño, distribución y conectividad de los vacíos en las mezclas asfálticas, utilizando la tomografía computarizada para evaluar su desempeño frente a la humedad, capilaridad y permeabilidad.

Un pavimento es una superficie artificial que actúa como revestimiento del suelo para conseguir que estén presentes las condiciones requeridas de solidez y firmeza, según el uso al que se destine. En la implementación de cada pavimento, es importante hacer evaluaciones previas correspondientes desde la selección de materiales de calidad idónea; hasta la compactación de especímenes de mezclas asfálticas según el Protocolo AMAAC (Asociación Mexicana de Asfalto, A.C.), las cuales deben cumplir un porcentaje de vacíos preestablecido en la normatividad mexicana del Instituto Mexicano del Transporte “*Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas*” que es de entre el 4 y el 6% de vacíos de acuerdo a la evaluación experimental es posible la implementación de la tomografía computarizada (CT).

La tomografía computarizada es una técnica ampliamente utilizada basada en el estudio de imágenes. Esta técnica permite conocer mediante algoritmos de reconstrucción y de un avanzado procesamiento de alta resolución por computadora, la estructura interna de mezclas asfálticas con el fin de analizar y modelar su desempeño. En particular, esta técnica

ha permitido estudiar el contenido, tamaño, distribución y conectividad de los vacíos y la relación de estas variables con la susceptibilidad al deterioro por la presencia de humedad, la capilaridad y la permeabilidad de las mezclas. Este proceso, varía en función de su temperatura, con esta investigación se pretende obtener una visión más certera de las implicaciones de dicho proceso utilizando el tomógrafo computarizado.

Se elaboraron muestras con asfalto natural, asfalto modificado con aditivo y asfalto modificado con polímero, considerando que los tipos más comunes de polímero son: SB (estireno – butadieno), SBS (estireno – butadieno – estireno), EVA (etilen – vinil – acetato) y SB emulsionado, conocido como látex; esto es recreando un pavimento asfáltico, tomando como variables su temperatura de compactación y mezclado. Partiendo de la hipótesis de que a mayor temperatura menor cantidad de vacíos.

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

*“SABIDURÍA, ANTE TODO;  
ADQUIERE SABIDURÍA; Y  
SOBRE TODAS TUS POSESIONES ADQUIERE INTELIGENCIA.”*

*Proverbios 4:7*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos asfálticos se definen como una mezcla de áridos de distinta granulometría con un agregado de asfalto que actúa como ligante. Estas mezclas se realizan en caliente y a temperatura tibia, y se extienden en varias capas para posteriormente compactarlas adecuadamente. Para asegurar la calidad del pavimento, es crucial cumplir con las normas estipuladas por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

La característica principal de la compactación es la existencia de vacíos en el interior que para contabilizarlos y determinar su tamaño, es posible someter la muestra o muestras a análisis no destructivo, a través de la técnica de tomografía computarizada de rayos X, por sus siglas en inglés, *Computed Tomography* (CT).

La tomografía computarizada de rayos-X, se basa en la adquisición de imágenes radiográficas y su posterior análisis empleando algoritmos computacionales. Esta técnica ha ganado amplia aceptación en los últimos años y ha sido empleada exitosamente para analizar la microestructura de diversos medios porosos, tales como textiles, materiales biológicos, suelos, mezclas asfálticas entre otros materiales. La tomografía computarizada de rayos X es una técnica que ha ganado aceptación para analizar la microestructura de medios porosos como mezclas asfálticas. Esta técnica permite obtener información detallada sobre el tamaño, distribución y conectividad de los vacíos, aspectos que influyen significativamente en el desempeño del material.

La importancia de la tomografía computarizada de rayos-X en mezclas asfálticas radica en que ha permitido contar con información confiable de su estructura interna para: **a)** determinar las características de sus vacíos (*tamaño, distribución y conectividad*: Masad *et*

*al.*, 2002, Álvarez *et al.*, 2007), **b)** caracterizar aspectos relacionados con su compactación (Watson *et al.*, 2004). La estructura de vacíos de las mezclas asfálticas determina en gran medida el desempeño del material en la obra. El parámetro que comúnmente se ha empleado para caracterizar los vacíos de mezclas asfálticas es el *contenido total de vacíos*, el cual constituye uno de los principales parámetros de control dentro de los procesos de diseño (e.g., método Marshall o Superpave) y construcción de estas mezclas. Sin embargo, la problemática principal reside en que el contenido total de vacíos no permite cuantificar el tamaño, distribución y conectividad de los vacíos individuales que existen en el interior de la mezcla. En estos estudios, las imágenes obtenidas a través de técnicas de rayos-X se procesaron usando algoritmos computacionales para realizar análisis probabilísticos del tamaño de vacíos en la muestra.

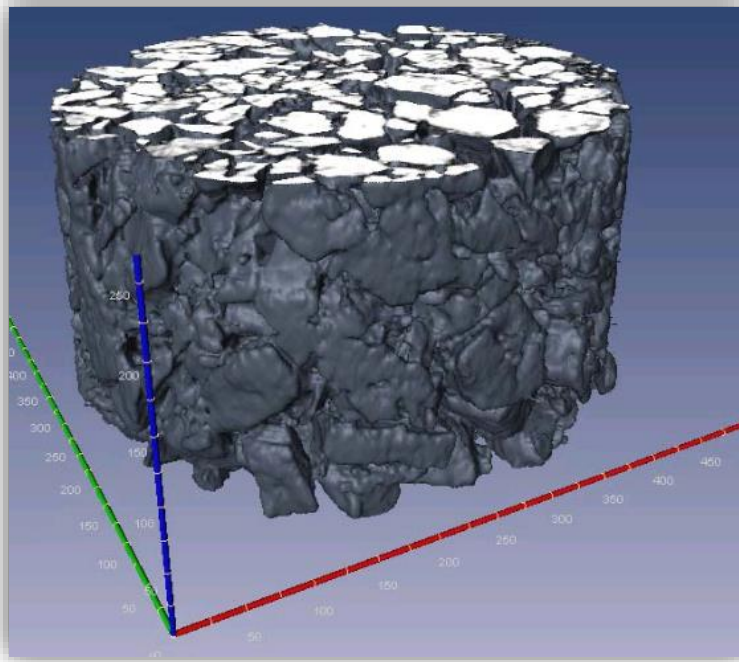
La identificación de los vacíos al interior de la mezcla se basa en la escala de grises de las secciones obtenidas durante el escaneo con rayos-X. El color de cada partícula en la imagen está directamente relacionado con la densidad del material que representa. Incluso, es posible realizar análisis de porosidad para cada espécimen, basándose en los diferentes colores que indican tamaños de poro, haciendo una reconstrucción a partir de 3000 imágenes radiográficas capturadas. (Fernández, *et al.*, 2014).

La principal ventaja de esta técnica es que, al ser no destructiva, es posible utilizar los mismos especímenes en pruebas de laboratorio posteriores con el fin de determinar sus características mecánicas, físicas o químicas.

Las técnicas de procesamiento de imagen y las reconstrucciones digitales son un paso fundamental para realizar simulaciones de materiales y estudiar sus fenómenos, por ejemplo, el envejecimiento y rejuvenecimiento de la mezcla asfáltica. Dichos fenómenos, son de gran importancia en el área de pavimentos y es por ello, que una gran aplicación de la tomografía computarizada se encuentra aquí. Recientemente, se está investigando en los Países Bajos, la posibilidad de aplicar mantenimiento preventivo en el uso de asfalto poroso (AP) mediante el rociado de productos de rejuvenecimiento en las superficies del pavimento. Estos estudios

se realizaron en núcleos de hormigón de AP, mismos que se analizaron mediante escaneos de tomografía computarizada industrial de alta resolución. Con el análisis se encontraron dos productos de rejuvenecimiento para aplicarse en campo y la distribución de los mismos, basándose en la escala de grises. (Zhang, Verwaal, Molenaar y Wu, 2015).

El contenido de vacío de aire de muestras de núcleos de asfalto podría determinarse por métodos directos e indirectos. La tomografía computarizada permite crear una imagen 3D completa sobre toda la estructura interna sin preparación ni fijación química de la muestra. El método propuesto puede determinar el contenido del vacío de aire con mucha precisión y proporciona gran cantidad de información adicional sobre otras.



***Figura 1. Imagen reconstruida tridimensional de la muestra de SMA 19SMA-B2 utilizando el CT de rayos X. <sup>1</sup>***

<sup>1</sup> Fuente: Kutay, E., Aydilek, A., & Masad, E., (2007). Estimation of Directional Permeability of HMA Based on Numerical Simulation of Micro-scale Water Flow. Journal of the Transportation Research Board, pp.1-3

## SECCIÓN 1.1

# HIPÓTESIS

*“ME LO CONTARON Y LO OLVIDÉ;  
LO VI Y LO ENTENDÍ;  
LO HICE Y LO APRENDÍ.”*

*Confucio*

## HIPÓTESIS

# A MAYOR TEMPERATURA:

SE EXPULSA MAYOR CANTIDAD DE HUMEDAD Y AIRE, HAY MAYOR APERTURA DE LOS POROS EN EL AGREGADO PÉTREO, SE MEJORA EL ANCLAJE DEL ASFALTO, SE REDUCE LA CANTIDAD DE VACÍOS, SE INCREMENTA LA CAPACIDAD ADSORBENTE ASFALTO – AGREGADO Y SE MEJORA EL DESEMPEÑO GENERAL DEL PAVIMENTO.

## SECCIÓN 1.2

# OBJETIVOS

*“CONSIDERO A LA NATURALEZA  
COMO UN AMPLIO LABORATORIO QUÍMICO,  
EN EL QUE TIENEN LUGAR TODA CLASE DE SÍNTESIS  
Y DESCOMPOSICIONES.”*

*Antoine Laurent de Lavoisier*

## OBJETIVOS

### ❖ OBJETIVO GENERAL:

Estudiar el efecto de la variabilidad de mezclas asfálticas tibias y calientes, empleando asfalto convencional y asfaltos modificados comparando métodos convencionales y mediante tomografía computarizada.

### ❖ OBJETIVOS PARTICULARES:

- a) Analizar el impacto de las temperaturas de mezclado y compactación en el desempeño de un pavimento asfáltico.
- b) Cuantificar el porcentaje de vacíos.
- c) Contrastar el efecto de los aditivos químicos implementados para disminuir la temperatura de mezclado y compactación.

## CAPÍTULO 2.

# MARCO TEÓRICO

*“EL HOMBRE SABIO ES FUERTE, Y  
EL HOMBRE DE CONOCIMIENTO AUMENTA SU PODER.”*

*Proverbios 24:5*

## 2. MARCO TEÓRICO

### ANTECEDENTES

#### GENERALIDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Las mezclas asfálticas son la combinación de agregados pétreos y un ligante asfáltico. Se elaboran normalmente en plantas mezcladoras, pero en algunos casos se pueden preparar *in situ*. Las principales propiedades que se desean en las mezclas son:

- **Estabilidad:** es su capacidad para resistir la deformación y el desplazamiento ante las cargas del tránsito, depende de la fricción y la cohesión.
- **Resistencia a las deformaciones permanentes:** es esencial para garantizar la durabilidad y la seguridad de las pavimentaciones asfálticas.
- **Resistencia a la fatiga:** es la capacidad de la mezcla para resistir la formación de grietas debido a la acción repetida de cargas o esfuerzos cíclicos que imitan el paso de vehículos sobre el pavimento durante un largo período de tiempo.
- **Resistencia al deslizamiento:** es una propiedad fundamental que determina el comportamiento de una superficie de rodadura frente a condiciones de deslizamiento o pérdida de adherencia, especialmente cuando está mojada.
- **Impermeabilidad:** es una propiedad fundamental ya que está directamente relacionada con la capacidad del pavimento para resistir la penetración de agua en su estructura.
- **Resistencia al envejecimiento:** es una propiedad crucial que refleja la capacidad de una mezcla asfáltica para mantener sus características de desempeño a lo largo del tiempo, a pesar de la exposición a factores como la radiación solar, las variaciones de temperatura, la humedad y el tráfico vehicular.
- **Durabilidad:** capacidad para mantener su rendimiento a lo largo del tiempo, resistiendo el desgaste causado por el tráfico, las condiciones climáticas y otros factores ambientales sin deteriorarse de manera significativa.

- **Trabajabilidad:** se refiere a su facilidad de manipulación, colocación, compactación y acabado durante el proceso de pavimentación.
- **Economía:** se refiere a los costos asociados con la producción, transporte, colocación y mantenimiento de una mezcla asfáltica.



**Ilustración 2. Estructura general de un pavimento.**

Los diversos tipos de mezclas asfálticas están conformadas por agregados pétreos con granulometría y requisitos mínimos de calidad diferentes (Reyes y Rondón, 2015). La estructura general de un pavimento se conforma de: terreno natural, subrasante, sub-base, base y carpeta asfáltica.

Reyes y Rondón (2015) definen a los agregados pétreos como “conglomerado de partículas inertes de gravas, arenas, finos y/o *fillers* (naturales o triturados), utilizados ya sea para la fabricación de mezclas asfálticas, concretos hidráulicos y materiales estabilizados o para la construcción de capas de terraplén, afirmado, subbase y/o base granular”.

En términos generales, en un ensayo de granulometría por tamizado, las partículas con diámetro entre 2 mm y 6.4 cm son reconocidas como gravas. Aquellas con diámetro entre 0.075 mm y 2 mm son reconocidas como arenas (gruesas y finas) y las que son de diámetro

inferior a 0.075 mm son reconocidas como tamaño de arcilla. Estas últimas pueden adquirir la denominación de *filler* o llenante mineral (Reyes y Rondón, 2015).

## MEZCLAS ASFÁLTICAS EN MÉXICO.

Aproximadamente, en el año 1900 se tuvo la primera aplicación de mezcla asfáltica en el Zócalo de la Ciudad de México y algunas calles del centro. Las mezclas asfálticas tienen un papel muy importante en el desarrollo de la infraestructura carretera de México y del mundo. Las mezclas asfálticas son el principal componente de aproximadamente el 95% de la infraestructura carretera mexicana proporcionando características de confort, seguridad y durabilidad.

En México, la entidad normativa que vigila y regula, a nivel nacional, la construcción, conservación y reconstrucción de carreteras y por lo tanto el diseño y elaboración de mezclas asfálticas es la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la cual dentro de sus normas acepta el uso de varios métodos de diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa como lo son el Hveem y el Marshall, de éstos el más popular y usado en la mayoría de los diseños de mezclas en México es el Método Marshall, que permite encontrar la combinación adecuada de asfalto y agregados minerales, a fin de tener características físicas y de resistencia, con el inconveniente de ser muy antiguo y como se sabe, las condiciones a las que se encuentra sometida la mezcla en los pavimentos han cambiado drásticamente, así como también han evolucionado de manera trascendental los materiales asfálticos y los procesos constructivos para la elaboración de las mezclas.

Actualmente, la nueva propuesta para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño en México es el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2008, surge con la necesidad de desplazar al Método Marshall y para colocarse dentro de la normativa nacional, aplicando la experiencia Mexicana, Americana y Europea en el diseño de este tipo de mezclas, cuyo principal objetivo es tener mezclas asfálticas que permitan pavimentos cómodos, seguros, económicos y durables, esto se logra con una mezcla que sea resistente al

rodamiento, agrietamiento por temperatura, agrietamiento por fatiga y a la susceptibilidad a la humedad (Tinoco, Z., Alarcón, J. 2017).

## DISEÑO Y COMPACTACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

El concreto asfáltico es conocido en todo el mundo como un material de construcción. Es apropiado para distintos campos de aplicación. Trabaja bajo la influencia de condiciones ambientales complejas y es especialmente usado en construcción de carreteras. En casi todos los tipos de concreto asfáltico se encuentran tres componentes principales: agregados, un agente bituminoso de unión y vacíos llenos de aire (Ilustración 1). La simulación apropiada de las propiedades mecánicas del concreto asfáltico comprende dos aspectos. Primero, la creación de microestructuras artificiales que reflejan las propiedades de un compuesto real y segundo, el modelo constitutivo de los constituyentes que queremos considerar.

La generación de microestructuras artificiales está basada en información obtenida de escaneos  $\mu$ CT. Las características en las que se requiere enfocarse son las fracciones de volumen, curva granulométrica, conectividad de partículas y la distribución del tamaño de partícula. La razón básica para la creación de microestructuras artificiales es la forma más eficiente para el análisis numérico y la flexibilidad para crear microestructuras diferentes en una cantidad de tiempo razonable, es casi imposible (Schüler, T., Jänicke, R., Steeb, H., 2014).

El concreto asfáltico es preparado mezclando los agregados finos y gruesos con el contenido de asfalto y compactado a un nivel específico de porcentaje de vacíos. La mezcla utilizó un aglutinante PG 58-28 con un contenido de asfalto de 5.60%. Las temperaturas de mezclado y compactación fueron ajustadas de acuerdo con las viscosidades de temperatura a 154°C y 130°C, respectivamente (Adhikari, S., You, Z., Peterson, K. 2013).

La mezcla asfáltica fue compactada usando un compactador giratorio a un nivel objetivo de vacíos de aire del 4%, 7% y 10%. Los números de compactación giratoria de los

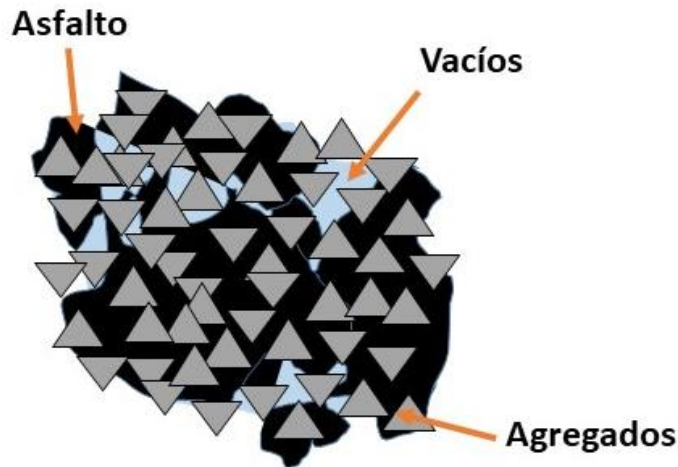
porcentajes de vacíos específicos de 4%, 7% y 10%, fueron designados con 53, 28 y 15 giros, respectivamente. Las dimensiones de los espécimenes cilíndricos compactados giratorios fueron de una altura de 160mm y un diámetro de 150mm (Adhikari, S., You, Z., Peterson, K. 2013).

Existen diversas variantes en el diseño de mezclas, una de ellas es la preparación de los espécimenes con un contenido de asfalto al 60% de agregado grueso con un tamaño máximo de agregado de 20mm. Para realizar la compactación se pueden seguir tres métodos de laboratorio; estos son: la compactación de rodillo giratorio, vibratorio y de bloque se usan para compactar muestras de mezcla asfáltica graduada. Usando la técnica de análisis de imágenes, las partículas de agregado ( $\geq 2$  mm) se separan de la mezcla y se caracterizan la orientación y distribución en la muestra compactada.

En 2012, Hassan, Airey, Khan y Collop, señalaron que “se encontró que los agregados cerca del borde de una muestra tienden a formar una alineación circunferencial, mientras que los agregados cerca del centro de la muestra se orientan aleatoriamente”. Usaron los tres métodos de compactación de laboratorio para investigar el efecto de los métodos de compactación en la estructura del agregado. Dos réplicas de cada tipo fueron preparadas, para alcanzar el mismo objetivo de contenido de vacíos de aire al 5%. Los detalles de la compactación fueron los siguientes:

- ❖ Giratoria: presión aplicada, 0.6MPa, ángulo de giro, 1.25° con 30 giros por minuto.
- ❖ Vibratoria: el martillo vibrante Kango se aplicó en ambas caras del espécimen para lograr la altura objetivo para la densidad especificada.
- ❖ Rodillo: se utilizó compactador de rodillos de acero liso con presión aplicada de 0.1Mpa.

Espécimenes cilíndricos vibratorios y giratorios fueron producidos con un diámetro y una altura de 100mm. Cuatro espécimenes cilíndricos con la misma dimensión fueron sacados de bloques de 300mm x 300mm x 100mm. (Hassan, Airey, Khan, Collop, 2012).



**Ilustración 3. Especimen de mezcla compactado.**

## NIVELES DE DISEÑO FINAL

La selección del contenido de asfalto puede ajustarse en este rango limitado para lograr propiedades de la mezcla que puedan satisfacer los requerimientos de un proyecto en especial; algunas propiedades serán más críticas que otras y, dependerán de circunstancias del diseño, como puede ser el tránsito, la estructura, el clima, el equipo de construcción y otros factores. Más allá, el proceso de balanceo no es el mismo para cada pavimento ni para cada diseño de mezcla (Garnica, Delgado y Alonso, 2004).

De manera general, los siguientes conceptos corresponden a la traducción del numeral 5.15 (*Selection of final mix design*) del Capítulo 2 del Manual del Instituto del Asfalto:

## SELECCIÓN DE LAS MUESTRAS DE MATERIAL.

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras del asfalto y del agregado que va a ser usados en la mezcla de pavimentación.

## EVALUACIÓN DE LA CURVA DE VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (VMA)

El éxito consiste en proporcionar suficiente espacio para el asfalto y permitir la adhesión adecuada para ligar las partículas de agregado cuando las temperaturas se incrementen y el asfalto se expanda [...] La densidad de la mezcla se incrementa cuando los VMA disminuyen.

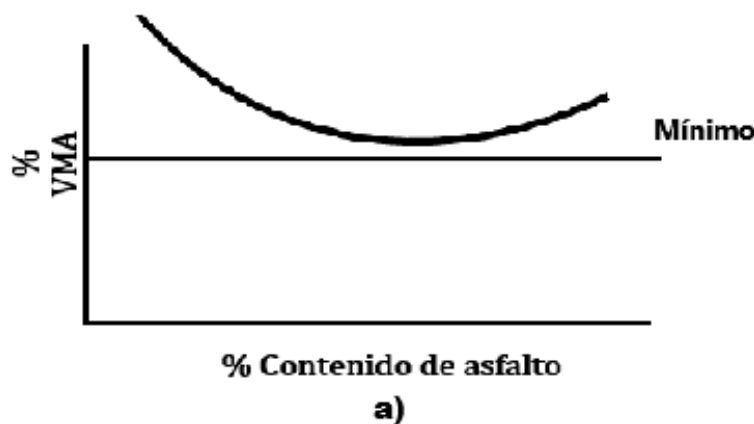
### EFFECTO DEL NIVEL DE COMPACTACIÓN:

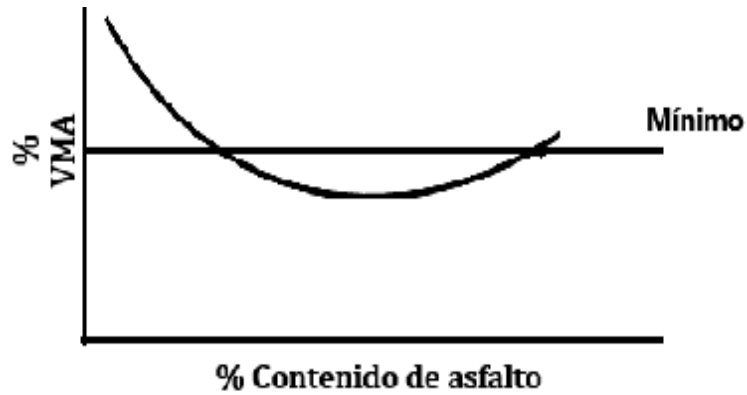
Para un mismo contenido de asfalto, los vacíos de aire ( $V_a$ ) y los vacíos en el agregado mineral (VMA) disminuyen a mayor esfuerzo de compactación.

En la Ilustración 3-a, el esfuerzo de compactación no sólo cambia las magnitudes de los valores, sino que el valor del contenido de asfalto varía para los VMA mínimos [...] y corresponde a un nivel de compactación de 150 giros.

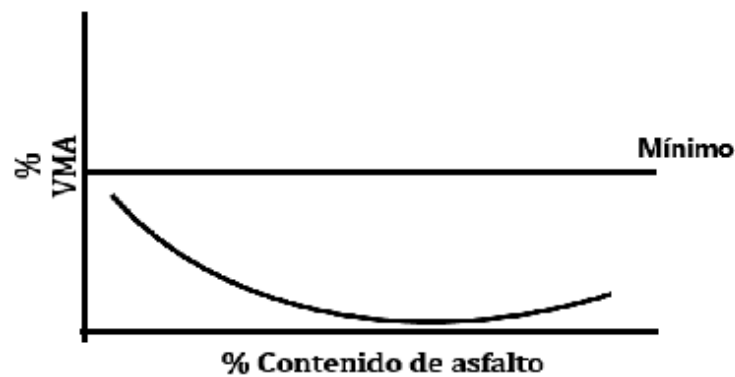
En la Ilustración 3-b, se muestra una mezcla diseñada con un nivel de compactación de 174 giros, se emplea para un pavimento con un volumen de tránsito menor y el porcentaje final de vacíos de aire ( $V_a$ ) será considerablemente más alto de lo planeado. Esta condición puede llevar a una mezcla más abierta (permeable).

Si el criterio mínimo de VMA está completamente por encima de todo el rango del contenido de asfalto (Ilustración 3-c), se justifica la reevaluación o el cambio en las fuentes del material.





**b)**



**c)**

*Ilustración 4. Relación entre VMA y límite de especificación para el rango de contenido de asfalto (Fuente: Manual del Instituto del Asfalto).*

#### USO DE LA TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA.

La tomografía computarizada de rayos X (CT) es una técnica no destructiva para visualizar la estructura interna y externa de diversos tipos de materiales. Actualmente se utiliza para examinar una amplia gama de materiales, incluidos roca, hueso, cerámica, metal y tejidos blandos (Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales, 2011). La mayoría de las personas está familiarizada con el uso de escaneos CAT en aplicaciones médicas donde

se usa para distinguir diferentes materiales y proporcionar una perspectiva tridimensional del interior de un objeto. Micro CT difiere de la exploración médica convencional CAT (Tomografía Axial Computarizada) en su capacidad para resolver detalles tan pequeños como algunos micrómetros de tamaño (es decir, menos de 0,001 pulgadas), incluso cuando se obtienen imágenes de objetos compuestos de materiales de alta densidad. Para producir imágenes de CT, se toman múltiples imágenes de rayos X a medida que el objeto gira alrededor de un eje de rotación central. Estas "proyecciones radiográficas" separadas del objeto se usan luego para determinar matemáticamente la densidad relativa del objeto en diferentes ubicaciones en el plano (s) de interés. El proceso de creación de imágenes se repite para cada porción deseada del objeto hasta que se haya producido una pila de imágenes que representa la estructura interna del objeto. Este conjunto de datos se puede exportar como pilas 2D de imágenes en cualquier plano deseado, o se puede estudiar y exportar en imágenes en 3D. Debido a las características que ofrece dicha técnica, ha sido de gran utilidad para emplearse en el análisis de vacíos de los especímenes compactados a 4" con mezclas asfálticas normales y modificadas (National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering, 2013).

### **PROCESAMIENTO DIGITAL DEL ESPÉCIMEN.**

Las técnicas de procesamiento de imagen y las reconstrucciones digitales son un paso fundamental para realizar simulaciones de materiales y estudiar sus fenómenos, por ejemplo, el envejecimiento y rejuvenecimiento de la mezcla asfáltica. Dichos fenómenos, son de gran importancia en el área de pavimentos y es por ello, que una gran aplicación de la tomografía computarizada se encuentra aquí. Recientemente, se está investigando en los Países Bajos, la posibilidad de aplicar mantenimiento preventivo en el uso de asfalto poroso (AP) mediante el rociado de productos de rejuvenecimiento en las superficies del pavimento. Estos estudios se realizaron en núcleos de hormigón de AP, mismos que se analizaron mediante escaneos de tomografía computarizada industrial de alta resolución.

Con el análisis se encontraron dos productos de rejuvenecimiento para aplicarse en campo y la distribución de los mismos, basándose en la escala de grises. (Zhang, Verwaal, Molenaar y Wu, 2015).

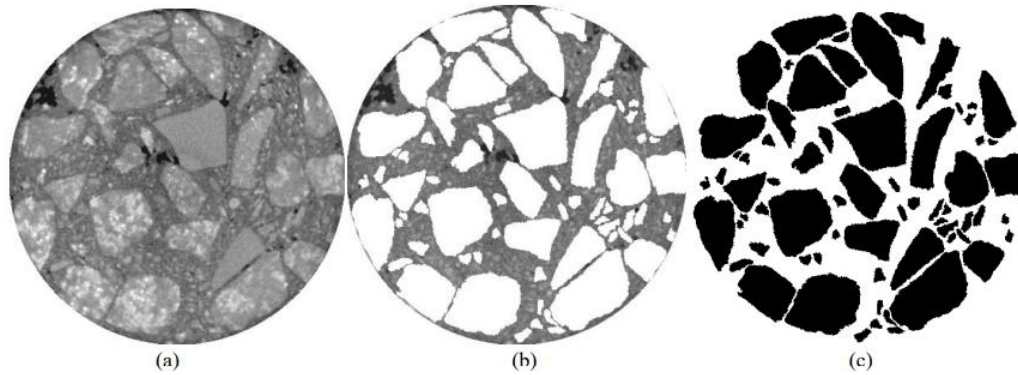
La evaluación de la CT se basó en el análisis de imágenes. Los cortes de CT fueron procesados por algoritmos automatizados usando parámetros predefinidos sin ninguna interacción del usuario.

La segmentación de agregados, vacíos de aire y materiales de unión se realizó con umbralización. Los algoritmos procesan las secciones de CT sucesivamente uno por vez. El resultado del proceso son estadísticas formadas en bloques (por corte y globalmente) y también imágenes segmentadas (Lublóy, *et.al.*, 2015).

## RECONSTRUCCIÓN DEL ESPÉCIMEN ANALIZADO.

Para realizar un adecuado proceso de reconstrucción, se tienen tres etapas: escaneo, segmentación y escalado de datos. En una reciente investigación, se ejercitaron dichas etapas en *Python (software)*, bajo el paradigma de programación orientada a objetos. Como resultado se reconstruyó un modelo digital tridimensional denominado *ToyModel*, un sólido tridimensional en voxeles de  $1 \text{ mm}^3$  (Fernández, Pacateque, Puerto, Reyes, 2015).

En el proceso de análisis y reconstrucción de las imágenes de los espécimenes con una resolución de  $0.083 \text{ mm/pixel}$ , se obtuvieron cortes horizontales de imágenes bidimensionales relativas a la altura del espécimen desde el fondo hacia arriba, en intervalos de  $1 \text{ mm}$ . Las imágenes fueron guardadas en formato TIFF como imagen de 8 bits, los cuales consisten en 256 niveles de intensidad de grises (0 a 255). Para ello, se usaron dos paquetes de software de imágenes, *ImageJ* e *Image-Pro Plus*. (Hassan, Airey, Khan y Collop, 2012).



Técnica de superposición para agregados (a) Imagen en escala de grises original (b) Imagen superpuesta (c) Imagen binaria después de la umbralización.

### PORCENTAJE DE VACÍOS DE AIRE.

El método propuesto puede determinar el contenido del vacío de aire con mucha precisión, dado que, proporciona gran cantidad de información adicional sobre otras características una al mostrar la distribución del contenido vacío de aire. Se podría obtener mucha información útil sobre las características estructurales de los pavimentos de carreteras mediante un método basado en CT. El contenido de aire vacío influye significativamente en la durabilidad y el rendimiento de las estructuras del pavimento. El contenido de vacío de aire de muestras de núcleos de asfalto podría determinarse por métodos directos e indirectos. La tomografía computarizada (CT) permite crear una imagen 3D completa sobre toda la estructura interna sin preparación ni fijación química de la muestra. (Lublóy, *et.al.*, 2015).

El *ToyModel* reconstruido tuvo una representación altamente significativa con respecto a la original, ya que el volumen de vacíos con aire de la muestra real debe estar entre 4 y 8% según la normatividad del Instituto de Desarrollo Urbano (Bogotá, Colombia) y se obtuvo un valor de 3.98%. (Fernández, Pacateque, Puerto, Balaguera y Reyes, 2014).

Los especímenes que fueron compactados anteriormente por tres métodos diferentes, correspondieron a un porcentaje de vacíos del 5% y se escanearon no destructivamente usando un equipo de tomografía computarizada de rayos-X con una fuente de 350kV, para

generar un mapa que representa la densidad de cada punto en la microestructura, con una resolución de aproximadamente 0.083 mm/pixel (Hassan, Airey, Khan y Collop, 2012).

## **VENTAJAS DE LA CT COMO TÉCNICA NO DESTRUCTIVA.**

La determinación de las propiedades de los materiales empleados en pavimentos es fundamental para diseñar y construir estructuras confiables, durables y económicas.

Las dos técnicas descritas en este documento hacen parte de un nuevo grupo de metodologías no destructivas aplicadas al estudio de materiales empleados en pavimentos y son una muestra de la tendencia mundial que existe para su caracterización, modelación y análisis.

La tomografía computarizada con rayos-X (CT) es un método eficaz para caracterizar la estructura interna de materiales porosos. Su empleo ha sido especialmente eficiente en el estudio de la microestructura de mezclas asfálticas, en particular en lo concerniente a la determinación de la estructura de vacíos (i.e., tamaño, distribución y conectividad) y al análisis de transporte de agua al interior del material.

La principal ventaja de esta técnica es que, al ser no destructiva, es posible utilizar los mismos especímenes en pruebas de laboratorio posteriores con el fin de determinar sus características mecánicas, físicas, o químicas. Dicho análisis permite analizar la estructura interna de los materiales sin dañarlos y observar características internas como inclusiones y poros. Asimismo, se facilita la medición precisa de áreas de superficie, volúmenes de poro, densidades y distribución de poros o inclusiones. Sin embargo, su principal limitación es la interpretación de los datos obtenidos después del análisis, y se requiere software especializado y personal capacitado,

Su principal limitación es la resolución de las imágenes resultantes.

Los equipos que se utilizan actualmente en el análisis de mezclas asfálticas pueden generar una resolución máxima de entre 10m y 100m, lo cual en ocasiones es insuficiente para estudiar ciertos fenómenos como el inicio y evolución de fisuras ocasionadas por cargas cíclicas (i.e., fatiga).

En la actualidad existen diversos sistemas basados en imágenes que permiten la caracterización morfológica de las piezas dentro de los que se destaca el Sistema de Imágenes de Agregados (AIMS), que emplea fundamentos matemáticos para la cuantificación directa e independiente de cada una de las propiedades geométricas de los agregados (forma, angularidad y textura) con base en el procesamiento de imágenes obtenidas mediante una cámara fotográfica (con dos fuentes de iluminación) y un videomicroscopio.

Esta metodología reporta importantes ventajas con respecto a la caracterización convencional de agregados, a la vez que ofrece diversas posibilidades para el mejoramiento y desarrollo de la industria de los agregados y la construcción vial.

Es de esperar que en el futuro cercano esta técnica sea implementada como parte de los ensayos estandarizados de caracterización de agregados y del diseño de mezclas asfálticas. (Lugo, Arámbula, Spinel, 2008).

Los resultados del análisis de CT también muestran que se pueden obtener resultados más precisos mediante CT que mediante pruebas de laboratorio.

Los análisis basados en pruebas de CT tienen muchas ventajas adicionales, más posibilidades de aplicación. Los análisis estructurales realizados por CT dan no solo un valor sino la distribución de valores, por lo que las características de cualquier parte dada pueden ser examinadas, lo que tiene un gran avance metodológico en los análisis estructurales (Lubloy, *et. al.*, 2015)

## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA

*“CONOCIMIENTO ES APRENDER ALGO CADA DÍA.  
SABIDURÍA ES DESAPEGARTE DE ALGO CADA DÍA.”*

*Nicolás Copérnico*

### 3. METODOLOGÍA

El trabajo experimental desarrollado en el presente trabajo de tesis se realizó en el Centro de Pruebas Analíticas No Destructivas, en el Laboratorio de Pavimentos del área de Ingeniería Civil de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y en el Laboratorio de Asfaltos de la empresa ERGON ASFALTOS MÉXICO.

Los asfaltos usados para la metodología presentan modificaciones con espumas y polímeros previamente, para probar la idoneidad al preparar los especímenes y evaluar la calidad. *(Ver Página 41)*

Por otra parte, la arena y mallas de  $\frac{3}{4}$ " y  $\frac{1}{2}$ " fueron adquiridas en el banco "LA LETRA" ubicado en el Estado de Puebla. Con las cuales, se hizo la propuesta granulométrica para determinar el contenido de grava para preparar las mezclas asfálticas al 6.5% de asfalto.

La parte experimental consistió en cinco etapas fundamentales y bien delimitadas, que a continuación se explican:

- **ETAPA 1: Análisis Granulométrico.**
- **ETAPA 2: Proceso de Mezclado.**
- **ETAPA 3: Proceso de Compactación.**
- **ETAPA 4: Análisis Tomográfico.**

Las etapas 1, 2 y 3 corresponden a las pruebas realizadas en el departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de las Américas Puebla.

#### 3.1 MÉTODOS CONVENCIONALES

##### ETAPA 1: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.

Los métodos convencionales corresponden al Método Marshall y SuperPave, los cuales fueron aplicados respectivamente para realizar la presente investigación.

El método Marshall (1930) es considerado un método empírico, que determina el contenido óptimo de asfalto para una mezcla que proporcione la resistencia y durabilidad

adecuadas para su uso. Crea espécimenes cilíndricos de 64mm (2½”) de altura y 102 mm de diámetro (4”). Así mismo, sigue un procedimiento de calentamiento, mezclado y compactación, bajo la capacidad adsorbente asfalto – agregado. Emplea una curva granulométrica ajustada según los requerimientos para calcular la granulometría de los diseños de mezcla.

El método Superpave (que significa *Superior Performing Asphalt Pavements*, o *Pavimentos Asfálticos de Alto Desempeño*) es un sistema que se desarrolló para diseñar mezclas asfálticas de manera más precisa y adaptada a las condiciones reales de uso. A diferencia de métodos más antiguos, Superpave toma en cuenta el clima (temperaturas extremas de la zona), el tipo de tráfico (como la cantidad y el peso de los vehículos) y otros factores que afectan el rendimiento del pavimento. En términos simples, Superpave busca que las carreteras duren más y sean más seguras, seleccionando el asfalto y los agregados adecuados para cada situación específica. Utiliza diferentes maquinarias para elaborar

La Etapa 1 de Análisis granulométrico se fundamentó en el pesado y cribado de agregados finos y gruesos a través de mallas que van desde 1” hasta Pasa No. 200, esto se realizó con el fin de obtener cantidades aproximadas de los gramos de agregado fino y grueso contenidos en la arena, para determinar si es material idóneo para compactar, ya que, si la cantidad de agregado fino hubiera sido mayor, este no habría cumplido con los requerimientos, es decir, se evalúa la calidad de los agregados.

Previamente, se pesó la muestra de arena y se lavó, luego se volvió a pesar y se calculó una diferencia denominada “error”.

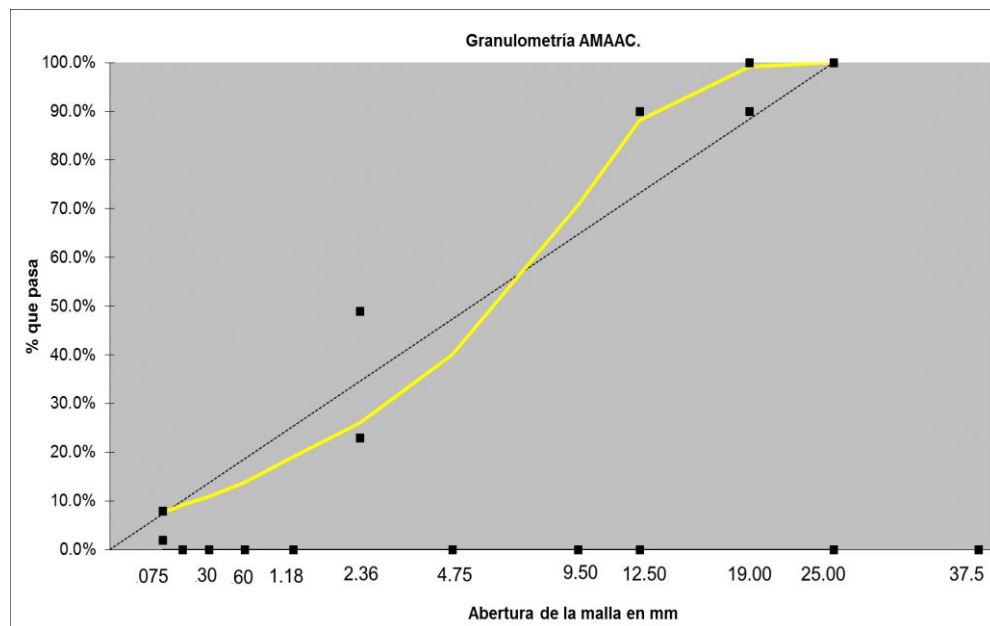
De esta manera, los datos obtenidos serían sustituidos en la siguiente fórmula, donde **B** es el *peso original de la muestra*, **C** es el *peso de muestra seca después del lavado* y **A** es el *porcentaje de material fino que pasa el tamiz de 0.075mm o malla No. 200 por lavado*.

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

$$A = \frac{1531g - 1362g}{1531g} * 100$$

$$A = 11\%$$

Posteriormente, se hizo el pesado y lavado de cada una de las gravas de  $\frac{3}{4}$  y  $\frac{1}{2}$ , con el fin de obtener una diferencia entre la masa inicial de la muestra y la masa final de la muestra, y se calculó el correspondiente porcentaje de masa de pérdida, que fue del 11%. Dicho valor, representa una buena cantidad de agregados finos para el diseño establecido.



**Gráfico 1. Propuesta granulométrica para el diseño de las mezclas asfálticas, % que pasa vs Abertura de la malla en mm.**

## ETAPA 2: PROCESO DE MEZCLADO.

La Etapa 2, el Proceso de Mezclado consistió en hacer una combinación de los agregados previamente lavados y pesados, de acuerdo con su granulometría establecida previamente, con el fin de tener la altura deseada de los espécimenes, esta es 4”.

Se calculó la cantidad de grava y arena para compactar 4 muestras de cada tipo de asfalto (AC-20, MT-1, MT- 2, MC-1 y MC-2). (Ver **Anexo ETAPA 1 “Análisis granulométrico”**).

Los agregados y el asfalto se calentaron a las temperaturas de mezclado precalentando el horno. (Ver **Tabla 1**).

**Tabla 1. Temperaturas de mezclado.**

<b>MT-1</b> <b>146°C± 5</b>	<b>MT-2</b> <b>151°C± 5</b>	<b>AC-20</b> <b>159°C± 5</b>	<b>MC-2</b> <b>171°C± 5</b>	<b>MC-1</b> <b>183°C± 5</b>
--------------------------------	--------------------------------	---------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

Se introdujeron los agregados pétreos de  $\frac{3}{4}$  y  $\frac{1}{2}$  en el horno y la cantidad de asfalto requerida para cada una de las muestras a preparar. Una vez alcanzada la temperatura establecida para cada tipo de asfalto, se adicionaron ambas gravas en el bote mezclador y la cantidad de asfalto previamente calculada para un porcentaje de 6.5%.

Después del mezclado de cada una de las muestras, asegurando que todas las partículas de agregado estén cubiertas de asfalto, se colocaron en charolas metálicas y se introdujeron en el horno para iniciar el proceso de envejecimiento durante 2 horas. (Ver **Anexo ETAPA 2 “PROCESO DE MEZCLADO”**)

### ETAPA 3: PROCESO DE COMPACTACIÓN.

El proceso de compactación se realizó posteriormente al envejecimiento de las muestras en el horno. El molde de compactación debió ser calentado para que alcanzara una temperatura similar a la de la compactación entre 136 y 139°C.

Por otra parte, las muestras se fueron retirando una a una respetando las temperaturas de compactación en el horno. (Ver **Tabla 2**).

**Tabla 2. Temperaturas de Compactación.**

<b>MT-1</b> <b>137°C ± 5</b>	<b>MT-2</b> <b>142°C±5</b>	<b>AC-20</b> <b>148°C± 5</b>	<b>MC-2</b> <b>159°C± 5</b>	<b>MC-1</b> <b>170°C± 5</b>
---------------------------------	-------------------------------	---------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

Los agregados pétreos de las charolas se fueron adicionando al molde de compactación, uno a uno, con ayuda de una espátula y luego se colocó en el compactador giratorio con las

especificaciones de compactación, que corresponden a una presión de 600KPa,  $1.16^{\circ} \pm 0.02^{\circ}$  su ángulo de giro y 100 giros.

Este diseño de mezcla correspondió al diseño SuperPave.

## 3.2 MÉTODO TOMOGRÁFICO

### 3.2.1 ANÁLISIS TOMOGRÁFICO.

Este proceso se llevó a cabo en el Laboratorio de Pruebas Analíticas No Destructivas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con un tomógrafo computarizado industrial NIKON METROLOGY (micro CT) de fuente dual de 225 kV y 450 kV, con el cual se realizó el análisis tomográfico de los espécimenes compactados empleando el cañón de 450kV, puesto que se trata de un material de alta densidad.

El análisis CT comenzó con el escaneo, el cual consiste en colocar la muestra sobre una base de unicel (no interfiere debido a la densidad del material) y posteriormente, sobre la mesa de trabajo procurando que esta se sitúe en el centro lo mejor posible. Después se realiza la inspección de la muestra, ajustando los parámetros de escaneo (kV, uA, y W) y utilizando un filtro de 1mm de cobre (Cu), su tiempo de análisis fue de 53 minutos con 4500 proyecciones obtenidas de un análisis de  $360^{\circ}$ . Una vez obtenidas las imágenes radiográficas del conjunto de datos adquiridos se procedió a realizar la reconstrucción tridimensional del volumen del material y finalmente, se realizó el análisis de porosidad en el software VGStudio, en el cual obtuve la información requerida para el análisis estadístico.

Enseguida, se comparó el porcentaje de vacíos teórico y experimental, lo cual, es el parteaguas para continuar con el análisis estadístico.

En el análisis tomográfico, se utilizó el software de análisis de imágenes VGStudio Max de *Volume Graphics 3.0*, el cual permitió realizar los siguientes pasos clave:

- 1. Escaneado del objeto.** Para realizarlo se utilizó el software *Inspect X*, ajustando los siguientes parámetros como la orientación del objeto, la energía de rayos X y el tiempo de integración del detector.

2. **Reconstrucción del volumen.** Para la reconstrucción se usa el software *XTEK CT 3D 5.1.3*. El volumen se moldeó con una matriz 3D de voxeles, donde cada voxel representa el coeficiente de atenuación del objeto escaneado, permitiendo mostrar detalles interiores de una imagen que quedaría tapada por la capa exterior más opaca de los voxeles.
3. **Segmentación o Umbralización (*threshold*).** Es el método más simple de segmentación. Fue posible aplicar la corrección sobre las proyecciones 2D para minimizar el efecto de la radiación dispersada y del endurecimiento del haz o *beam hardening*, que resulta en un haz de energía eficaz mayor.
4. **Análisis de Porosidad.** Se realizó este análisis usando la función de porosidad, en la cual existe un ícono el cual permitió ajustar la transparencia. Los valores ideales para una mejor apreciación de la distribución de los poros corresponden al 90 y 100% de transparencia.

## CAPÍTULO 4

# RESULTADOS

*“BUENA ES LA SABIDURÍA CON HERENCIA  
Y PROVECHOSA PARA LOS QUE VEN EL SOL”.*

*Eclesiastés 7:11*

## 4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados alcanzados al utilizar, métodos convencionales y análisis tomográfico. Con el fin de lograr los objetivos planteados al inicio de la tesis, los datos obtenidos se analizaron con el programa Minitab, con el cual se generaron gráficos a partir de la selección, ordenamiento y análisis matemático de los datos, mismos que nos dan una idea más exacta y precisa, con un índice de confiabilidad del 95%.

### MÉTODOS CONVENCIONALES

De acuerdo con, lo estipulado en los métodos convencionales (Método Marshall y Superpave), mencionados previamente, el cálculo del porcentaje de vacíos se obtuvo de forma manual, registrándose los siguientes valores (*Ver Tabla 3*).

**Tabla 3. Porcentaje de vacíos obtenido por métodos convencionales**

TIPO DE ASFALTO	PORCENTAJE DE VACÍOS	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN
MT-1	5.07%	137°C ± 5
MT-1	4.97%	137°C ± 5
MT-1	4.38%	137°C ± 5
MT-2	4.53%	142°C ± 5
MT-2	4.72%	142°C ± 5
MT-2	4.64%	142°C ± 5
AC-20	3.22%	148°C ± 5
AC-20	3.24%	148°C ± 5
AC-20	3.42%	148°C ± 5
MC-2	4.39%	159°C ± 5
MC-2	5.16%	159°C ± 5
MC-2	4.29%	159°C ± 5
MC-1	6.07%	170°C ± 5
MC-1	5.48%	170°C ± 5
MC-1	5.19%	170°C ± 5

En el Gráfico 2. se muestran los porcentajes de vacíos obtenidos por métodos convencionales, con respecto a la temperatura de compactación y de esta manera, es posible observar que los porcentajes de vacíos se obtuvieron en un rango de entre 3 y 6.5%. Donde la mayor parte de los especímenes compactados con diferentes aditivos y sin aditivos, se ubican en un intervalo de temperaturas de entre 135 y 155°C.

Considerando los métodos convencionales, las temperaturas más altas de compactación están generando un alto porcentaje de vacíos llegando a 6.5%.

Los especímenes compactados a una temperatura de 170°C, identificados como MC-1-1, MC-1-2 y MC-1-3 tienen un porcentaje de vacíos de entre 5 y 6.5%, calculados por métodos convencionales. Mientras que los especímenes de asfalto AC-20, presentan un porcentaje de vacíos del 3%.

## ANÁLISIS TOMOGRÁFICO

Para el cálculo del porcentaje de vacíos se empleó la siguiente secuencia de cálculos matemáticos:

1. Se recopilaron los volúmenes totales 1, 2 y 3 de cada espécimen obtenidos del tomógrafo computarizado en  $\text{mm}^3$ , en una hoja de trabajo de Minitab.
2. Se ordenó el número de poros de cada espécimen, en otra columna de Minitab.
3. Los valores de los volúmenes de vacíos se convirtieron a  $\text{cm}^3$ .
4. Se calcularon los promedios de los volúmenes de vacíos

5. Una vez hechos los primeros cálculos, se realizó el cálculo del volumen total de cada espécimen tomando en cuenta, el volumen de vacíos y el volumen del material.
6. Finalmente, se obtuvo el porcentaje de vacíos por espécimen a partir del volumen de vacíos y el volumen total.
7. El procedimiento anterior se ve reflejado en la siguiente secuencia de cálculos matemáticos:

$$V_{void} = \sum_i^n = 1 V_{p_i} n$$

$$V_T = V_{mat} + V_{void}$$

$$\Phi_i = \frac{V_{void}}{V_T} * 100\%$$

Donde:

- $V_{void}$  = Volumen de vacíos
- $V_{p_i}$  = Volumen de poros
- $V_T$  = Volumen total
- $V_{mat}$  = Volumen de material
- $n$  = Número de poro
- $\Phi_i$  = Porcentaje de vacíos

Los datos obtenidos con las fórmulas anteriores fueron recopilados y calculados en Minitab, para posteriormente graficarlos. A continuación, se presentan los resultados con su respectiva explicación.

En la Tabla 4, se aprecia la relación entre el número de poro vs volumen de poro, en el cual se observa que los especímenes con asfalto MT-1, se encuentran en un rango de volumen de entre 10 000 y 12 000 mm<sup>3</sup>, que corresponden a los poros de mayor tamaño.

Mientras que el espécimen con un menor volumen de poros corresponde al elaborado con asfalto MT-2, que se ubica en un rango de entre 4000 y 5000 mm<sup>3</sup> de volumen de poros, y con un número de poros menor a 10000. Cabe mencionar que el gráfico contiene el porcentaje de vacíos calculados, a partir de la información del tomógrafo computarizado y se puede observar que en los especímenes compactados con asfalto MT-2, presentan los porcentajes más altos (9.43 y 9.73%) y en uno de ellos el más bajo (1.07%), lo que muestra que es un rango de temperaturas inestable.

De acuerdo con los datos obtenidos, los datos AC-20 muestran un número de poros de entre 40000 y 50000 y su volumen de poros, se encuentra entre 7000 y 8000mm<sup>3</sup> con un porcentaje de vacíos de entre 1.55 y 1.81%. Por otra parte, los especímenes MC-1 tienen un porcentaje de vacíos de entre 2.12 a 2.49%, con un número de poros entre 3000 y 4000 que muestran que, a mayor temperatura de mezclado y compactación, este valor se reduce y el porcentaje de vacíos se acerca un poco más al valor de 4% esperado.

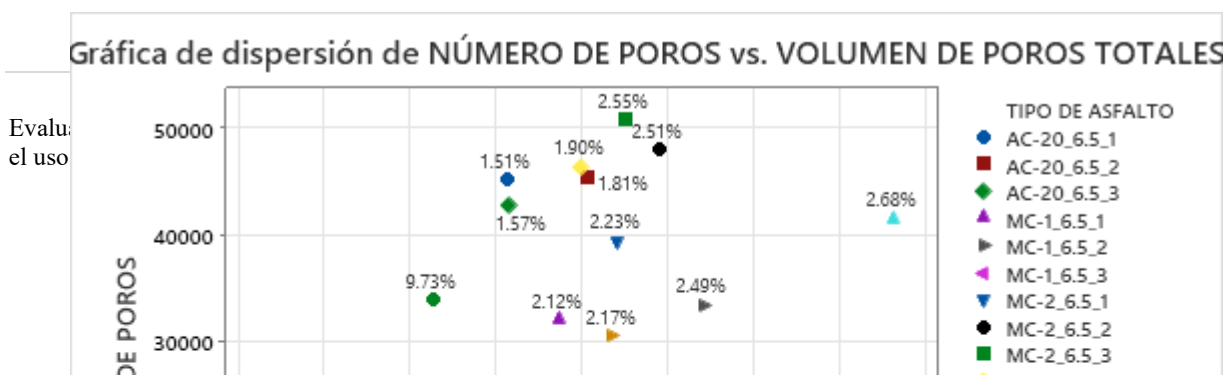
Con respecto, a los especímenes MC-2, el número de poros va desde 40000 a arriba de 50000 y el porcentaje de vacíos corresponde a un rango de entre 2.23 a 2.55%.

Adicionalmente, se incluyó en la Tabla 4, el tipo de aditivo que fue agregado a cada grupo de mezclas asfálticas; así como su temperatura de compactación, que juega un papel importante al momento de evaluar el desempeño del método convencional.

Tabla 4. Porcentaje de vacíos obtenido por método convencional,

TIPO DE ASFALTO	NÚMERO DE POROS	VOLUMEN DE POROS TOTALES POR MUESTRA [mm <sup>3</sup> ]	ADITIVOS	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C)	PORCENTAJE DE VACÍOS
MT-1_6.5_1	46469.00	7986.28	ESPUMANTES	137°C ± 5	5.07%
MT-1_6.5_2	41614.00	11621.65	ESPUMANTES	137°C ± 5	4.97%
MT-1_6.5_3	30608.00	8349.30	ESPUMANTES	137°C ± 5	4.38%
MT-2_6.5_1	2717.00	4295.85	ESPUMANTES	142°C ± 5	4.53%
MT-2_6.5_2	21677.00	6005.88	ESPUMANTES	142°C ± 5	4.72%
MT-2_6.5_3	33962.00	6261.65	ESPUMANTES	142°C ± 5	4.64%
AC-20_6.5_1	45285.00	7117.79	SIN ADITIVO	148°C ± 5	3.22%
AC-20_6.5_2	45436.00	8068.49	SIN ADITIVO	148°C ± 5	3.24%
AC-20_6.5_3	42798.00	7144.02	SIN ADITIVO	148°C ± 5	3.42%
MC-2_6.5_1	39535.00	8405.43	POLÍMERO	159°C ± 5	4.39%
MC-2_6.5_2	48082.00	8900.82	POLÍMERO	159°C ± 5	5.16%
MC-2_6.5_3	50826.00	8500.93	POLÍMERO	159°C ± 5	4.29%
MC-1_6.5_1	32144.00	7727.37	POLÍMERO	170°C ± 5	6.07%
MC-1_6.5_2	33565.00	9409.34	POLÍMERO	170°C ± 5	5.48%
MC-1_6.5_3	21335.00	10205.16	POLÍMERO	170°C ± 5	5.19%

Los datos anteriores fueron obtenidos del software Volume Graphics, del tomógrafo computarizado y se obtuvo la relación del número de poros, su volumen y el porcentaje de vacíos para cada muestra compactada, con el fin de determinar si la temperatura de compactación y mezclado han afectado o beneficiado a las mezclas asfálticas, analizando adicionalmente el Gráfico 3.





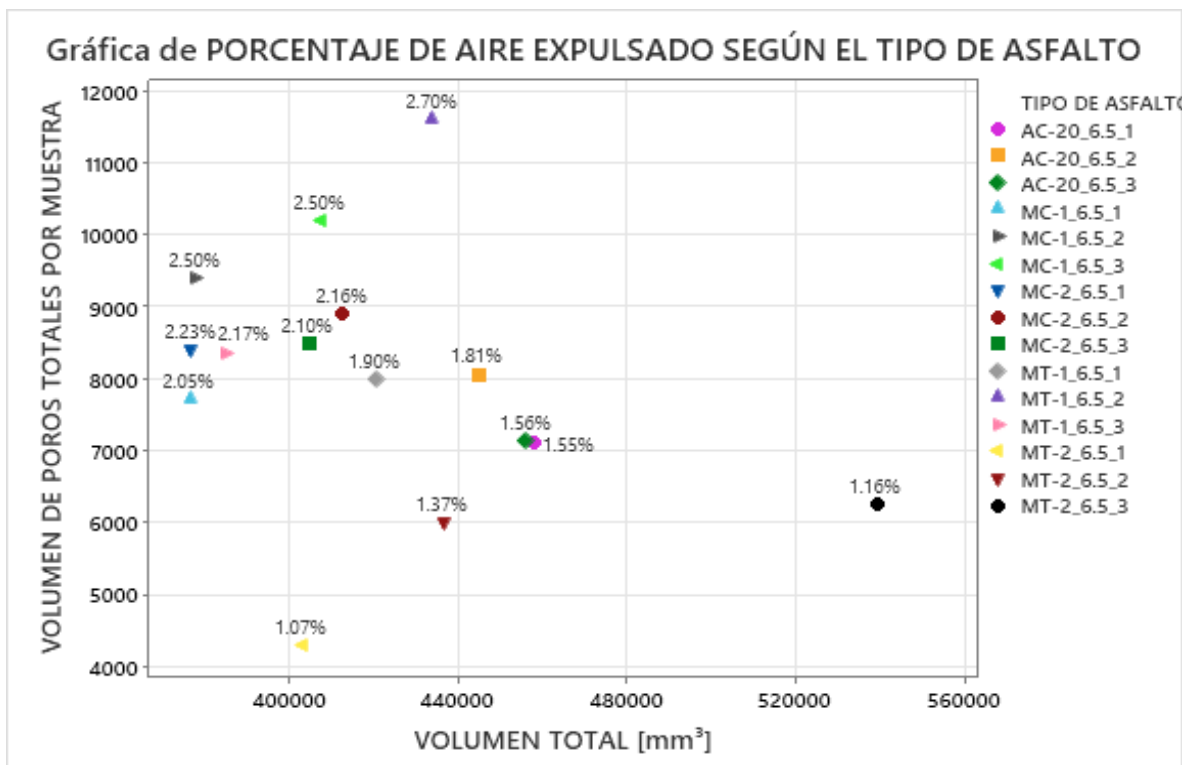
**Gráfico 3. Gráfico de dispersión de NÚMERO DE POROS VS VOLUMEN DE POROS CON PORCENTAJE DE VACÍOS**

Enseguida, en el Gráfico 4 se analiza la influencia de la temperatura en el porcentaje de aire expulsado, para determinar si una mezcla es densa y posiblemente tenga mayor resistencia. Este resultado es de alta importancia para evaluar la calidad y durabilidad de la mezcla asfáltica en campo.

Por medio de la técnica de tomografía computarizada, se obtuvieron porcentajes mucho más precisos, tanto de vacíos como de aire expulsado por la variación de la temperatura.

De acuerdo, con la información recabada en el Gráfico 4, el mayor porcentaje de aire expulsado corresponde a 2.70%, el menor es de 1.07% y pertenecen a los especímenes MT-1 y MT-2. Los porcentajes de aire expulsado se relacionan con un volumen de poros muy alto, intermedio y bajo, mostrando inestabilidad en las mezclas asfálticas tibias.

Por otra parte, el resto de las mezclas asfálticas presentan un porcentaje mayor a 2 y menor a 3% de aire expulsado y su rango es entre 7000 a 11000 mm<sup>3</sup> de volumen de poros por muestra. Los especímenes tienen un volumen total entre 300000 a 480000mm<sup>3</sup>.



**Gráfico 4. Gráfico de dispersión de PORCENTAJE DE AIRE EXPULSADO**

En el Tabla 5, se muestra un cuadro comparativo de los porcentajes de vacíos obtenidos por métodos convencionales y por tomografía computarizada; así mismo, se marca una diferencia notable entre ambas técnicas.

Por una parte, los métodos convencionales presentan un rango de porcentaje de vacíos, mencionados anteriormente, de 3% a 6%, mientras que la tomografía computarizada presenta un rango de porcentaje de vacíos, de 1.55% a 9.7%, lo cual, genera incertidumbre acerca de la confiabilidad de los métodos convencionales y la precisión de la tomografía computarizada.

**Tabla 5. Cuadro comparativo de PORCENTAJES DE VACÍOS OBTENIDOS POR MÉTODOS CONVENCIONALES Y TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA**

<b>TIPO DE ASFALTO</b>	<b>% DE VACÍOS (Métodos convencionales)</b>	<b>% DE VACÍOS (Tomografía computarizada)</b>	<b>DIFERENCIA</b>
AC-20_6.5_1	3.22%	1.55%	1.67
AC-20_6.5_2	3.24%	1.81%	1.43
AC-20_6.5_3	3.42%	1.57%	1.85
MT-1_6.5_1	5.07%	1.90%	3.17
MT-1_6.5_2	4.97%	2.68%	2.29
MT-1_6.5_3	4.38%	2.17%	2.21
MT-2_6.5_1	4.53%	1.07%	3.46
MT-2_6.5_2	4.72%	9.43%	4.71
MT-2_6.5_3	4.64%	9.73%	5.09
MC-1_6.5_1	6.07%	2.12%	3.95
MC-1_6.5_2	5.48%	2.49%	2.99
MC-1_6.5_3	5.19%	2.50%	2.69
MC-2_6.5_1	4.39%	2.23%	2.16
MC-2_6.5_2	5.16%	2.51%	2.65
MC-2_6.5_3	4.29%	2.55%	1.74

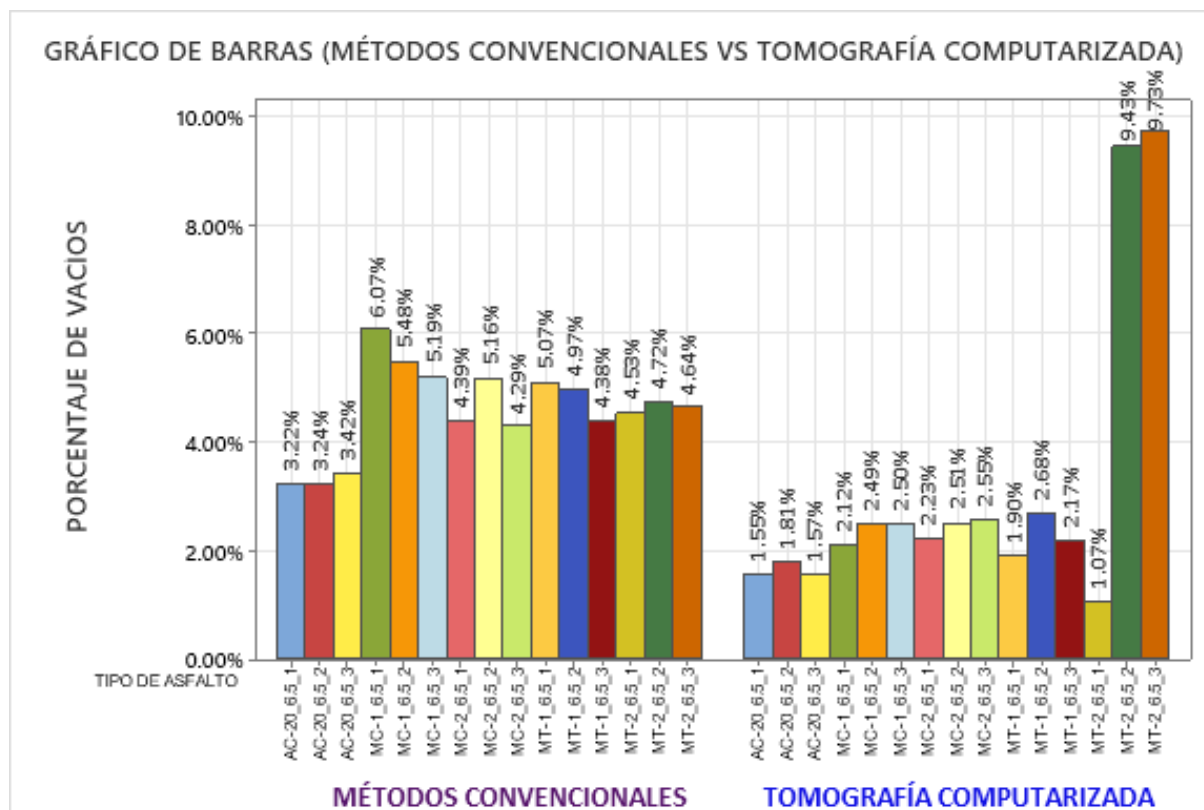
Sin embargo, cabe recalcar que la tomografía computarizada va a mostrar paso a paso, el análisis de las muestras asfálticas a más de 3000 imágenes, lo que genera una base de datos bastante robusta, capaz de analizarse desde varias vertientes y da pie, a mejorar las

técnicas de análisis. Ahora bien, los métodos convencionales se han usado por años y aún en la actualidad se usan de apoyo para la enseñanza en la ingeniería civil.

En función de la información de la Tabla 4, un espécimen AC-20 en sus tres muestras, muestra un valor por debajo del esperado, considerando que es un asfalto normal y no tiene aditivos poliméricos tiene un menor desempeño, considerando la tomografía computarizada y los métodos convencionales. A continuación, un espécimen MT-1, perteneciente a la mezcla asfáltica tibia con espumas como aditivos, según los métodos convencionales se encuentra en un rango de 4 a 5%; sin embargo, en tomografía computarizada está en un rango menor a 3%, existiendo una diferencia significativa. Comparativamente, el espécimen MT-2 presenta una media aceptable de 4%, por métodos convencionales, pero la cuestión totalmente sorprendente, es que, en tomografía computarizada, los valores están descajados con valores de 1% y 9%. Finalmente, analizando las mezclas asfálticas MC-1 y MC-2, muestran menor variabilidad en cuanto a su porcentaje de vacíos. En el caso de los métodos convencionales, su rango es de 4% menor a 5%; sin embargo, sucede algo muy similar con los datos de la tomografía computarizada, pues en esta técnica se mantienen estables los resultados, pero son menores al 4% significando que no cumplen los límites de 4 a 6%, establecidos como rango máximo y mínimo, respectivamente.

De manera muy general, los porcentajes de vacíos obtenidos por métodos convencionales no rebasan el 6% de vacíos y se encuentran en un rango “óptimo”; no obstante, por métodos tomográficos los valores mínimos no superan los 3% y el valor máximo único ronda el 9% de porcentaje de vacíos.

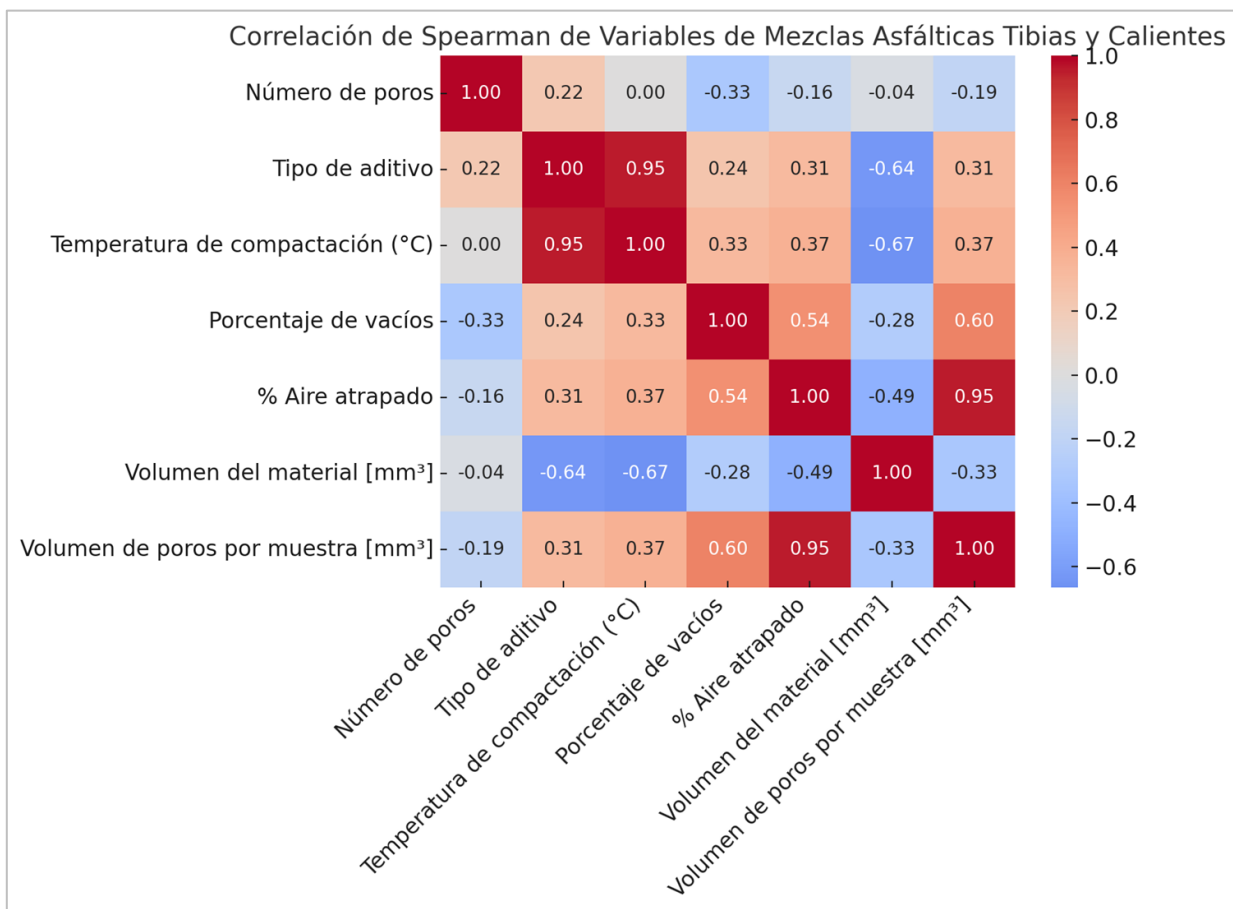
En el Gráfico 5, se esquematiza la información de la tendencia de porcentaje de vacíos y su variabilidad. Como se especificó en el párrafo anterior, la variabilidad de los porcentajes de vacíos en los métodos convencionales se mantiene en un rango de entre 3 y 6%, y en la tomografía computarizada la brecha es más corta a excepción de los valores mayores.



**Gráfico 5. Tendencia de los porcentajes de vacíos de los métodos convencionales y tomografía computarizada.**

En el gráfico de probabilidad, los puntos del porcentaje de vacíos hallados a través de métodos convencionales se ajustan a la línea recta y con respecto al p-valor, la relación encontrada es de  $0.372 > 0.05$ , lo que significa que siguen una distribución normal. Por otra parte, la desviación estándar es mayor, con un valor de 0.008154, lo que indica una mayor variabilidad.

Por otra parte, analizando los porcentajes de vacíos obtenidos por tomografía computarizada, los puntos no siguen una línea recta que se puede predecir a simple vista y adicionalmente, el p-valor  $< 0.005$ , indica que los datos no siguen una distribución normal; asimismo, la desviación estándar es de 0.002754, un valor más pequeño que permite tener los valores mayormente concentrados alrededor de la media.



**Gráfico 6. Gráfico de calor de correlación de Spearman de variables de mezclas asfálticas tibias y calientes.**

El gráfico 6 de calor pertenece a la correlación de Spearman, que permite evaluar de manera muy puntual, la relación que existe entre las variables del proceso de las mezclas asfálticas tibias y calientes, y no asume una relación paramétrica, como lo es la normalidad. Cabe mencionar que una correlación mide el grado en que dos variables cambian al mismo tiempo, en la misma dirección o en sentido contrario; asimismo, el coeficiente de correlación ( $\rho$ ) muestra la fuerza y el sentido de la relación, donde se utilizan valores de -1, 0 y 1, respectivamente.

En el gráfico, es posible apreciar que el rango de valores está entre -0.67 y 0.95, lo que indica que existen relaciones positivas fuertes y negativas medias.

Analizando los datos obtenidos, existe una correlación positiva entre el porcentaje de vacíos y el porcentaje de aire atrapado ( $\rho = 0.54$ ), ya que este último contribuye al aumento de volumen de vacíos en la muestra. Una segunda correlación positiva, corresponde al volumen de poros totales por muestra con respecto al tipo de aditivo ( $\rho = 0.31$ ); para esta correlación lo ideal fue cuantificar los tipos de aditivos agregados a las mezclas asfálticas, con el fin de hacer una relación numérica, y ver el incremento o disminución del volumen de los poros conforme se agrega o no, algún aditivo. Asimismo, la correlación entre temperaturas de compactación y el tipo de aditivo, es positiva y fuerte ( $\rho = 0.95$ ), ya que los aditivos poliméricos necesitaron de temperaturas de compactación más elevadas, seguidos de los aditivos espumosos y finalmente, las temperaturas asignadas a las mezclas asfálticas sin aditivos.

A partir del análisis matemático, se obtuvieron también correlaciones negativas. La primera de ellas corresponde al número de poros y al porcentaje de aire atrapado, ya que no necesariamente un cierto número elevado de poros implicaría la presencia de más aire atrapado.

## 5. CONCLUSIONES

El principal objetivo de esta tesis es estudiar el efecto de la variabilidad de mezclas asfálticas tibias y calientes empleando asfalto convencional (AC-20) y asfaltos modificados (MT-1, MT-2, MC-1 y MC-2), comparando métodos convencionales y mediante tomografía computarizada.

El trabajo de tesis está basado en las actividades siguientes:

- Se seleccionó el agregado pétreo de acuerdo con los requerimientos del diseño granulométrico.
- Se seleccionaron los asfaltos a utilizar de acuerdo con las temperaturas en que presentan un óptimo desempeño, de acuerdo con su ficha técnica, que en este caso fueron dos asfaltos modificados con espumas, dos modificados con resinas poliméricas y uno convencional.
- El diseño volumétrico se basó en encontrar la granulometría y el porcentaje de asfalto según los requerimientos.
- Los especímenes compactados fueron sometidos a análisis por métodos convencionales en ingeniería civil y por tomografía computarizada, y sus resultados, comparados.
- La porosidad de los especímenes se comparó con la obtenida por cálculos empíricos y por tomografía computarizada.
- Se evaluó el efecto de la temperatura de mezclado y compactación de cada espécimen, con respecto al porcentaje de vacíos obtenido por ambos métodos analíticos.
- Se comprobó la diferencia notable en cuanto a datos obtenidos de acuerdo con ambos métodos (convencionales y tomográficos).

De manera general, las conclusiones a las que se llegaron fueron las siguientes:

## TEMPERATURA DE MEZCLADO Y COMPACTACIÓN

- a) Las temperaturas de mezclado y compactación jugaron un papel muy importante para la elaboración de los especímenes, y como se pudo observar, si generaron un impacto, que a grandes escalas afectaría de manera directa el desempeño de un pavimento asfáltico. Cuando se trató de mezclas tibias pertenecientes a los asfaltos MT-1 y MT-2, fueron las que mayor inestabilidad presentaron en los gráficos realizados y los cálculos por ambos métodos. Cabe mencionar que se encuentran en un rango de temperatura de 151°C, para mezclado y 142°C, para compactación. De acuerdo, con la correlación de Spearman, la temperatura de compactación principalmente afecta medianamente a las variables medidas, lo que significa que es solo una parte para que el resultado cambie.

## PORCENTAJE DE VACÍOS

- b) Como se observó en los gráficos elaborados a partir de métodos convencionales, los datos graficados se presentan ajustados a una “idealidad”, es decir, que se encuentran en un rango de porcentajes de vacíos de entre 4 y 6%, considerándose que se ajusta a los valores esperados de acuerdo con los requerimientos. Por otra parte, comparando los valores obtenidos mediante tomografía computarizada, a partir de 3000 imágenes de cada espécimen, estos arrojaron porcentajes de vacíos de entre 1 y 3%, que representan una diferencia altamente notable. Incluso, analizando los gráficos de porcentajes de vacíos elaborados en Minitab, es posible analizar que los especímenes AC-20, son bajos en porcentaje de vacíos, pero con poros muy grandes en su estructura en comparación con el resto. Por otra parte, los especímenes MC-1 y MC-2 presentaron una menor cantidad de poros y un menor volumen total. Sin embargo, es importantísimo mencionar que la tomografía computarizada

representa un método analítico no destructivo, que muestra una información más detallada y precisa, en comparación a los métodos convencionales. Si bien estos últimos pueden servir de aproximación a una prueba de campo, la tomografía computarizada, lo hace a profundidad y con datos más robustos. De acuerdo con los resultados de la correlación de Spearman, los aditivos se comportarán de determinada manera de acuerdo con la temperatura que se les aplique, incluso llegando a afectar la estructura interna y el desempeño.

#### ADITIVOS QUÍMICOS

- c) Analizando los resultados, con respecto a los especímenes modificados es preciso echar mano de la tomografía computarizada, se observó que las mezclas tibias, con aditivos espumantes presentaron menos estabilidad; sin embargo, se puede lograr un ajuste al porcentaje de vacíos del 4 y 6%, con la finalidad de darle estabilidad a dichas mezclas que puedan aplicarse con un enfoque ecológico. Con los datos de correlación de Spearman, los aditivos químicos pueden cambiar las características de las mezclas asfálticas, influidos por las temperaturas de mezclado y compactación.

#### MÉTODOS CONVENCIONALES Y TOMOGRÁFICOS

- d) De acuerdo con los datos obtenidos en los resultados, se determinó que la técnica convencional utilizada dentro del ramo de la ingeniería civil mostró un porcentaje aproximado de la porosidad de las mezclas asfálticas; además de ser un método destructivo, porque requirió la preparación de muestras físicas y pruebas de laboratorio que implicaron mayor costo y tiempo. No obstante, el método tomográfico resultó ser no destructivo, mucho más detallado y preciso en el estudio de la estructura interna de las mezclas asfálticas y su análisis estadístico.

## 6. REFERENCIAS

- Abad, B. (2015). *Selección y Formulación de un agente desemulsificante para la deshidratación del crudo, proveniente de la plataforma Albacora, lote Z-1* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Piura, Perú.
- Acuña, M. J. (2012). Consideraciones Generales sobre la compactación de espécimenes de mezcla asfáltica en caliente (MAC) en el Compactador Giratorio Superpave. *Métodos y Materiales*, 16.
- Álvarez, A. E., Arámbula, E. & Caro, S. (2008). Tomografía computarizada con rayos-x y sistema de imágenes de agregados (AIMS) para el estudio de mezclas asfálticas y agregados. *Ingeniería e Investigación*, 28 (2), 142-151, 2008.
- Álvarez, A. E., Carvajal, J. S., Fuentes, L G. (2013). Principales hallazgos del análisis de la estructura interna de mezclas asfálticas determinada a partir del uso de Tomografía Computarizada de Rayos –X. *Ingeniería e Investigación*, 1–4, 2013.
- Castillo, J. M. (2014). Aplicación de la tomografía computarizada o tac en el cálculo de los parámetros biomecánicos de la sección transversal de los huesos largos. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.*, 1-12.
- Cebrián, J. J. (2014). *Ejecución de pavimentos de hormigón impreso*. IC Editorial.
- Garnica, P., Delgado, H. y Alonso, S. (2004). *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. Querétaro, Qro., pp. 1-67. <http://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt246.pdf>
- Fernández, W.D., Pacateque, J.D., Puerto M.S., Balaguera, M.I., Reyes, F. (2015). Asphalt mixture digital reconstruction based on CT images. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(1), pp. 17 – 25.
- Hassan, N. et. al. (2012). *Nondestructive Characterisation of the Effect of Asphalt Mixture Compactation on Aggregate Orientation and Segregation Using X-ray Computed Tomography*.

- Loria, L.G. (2007). Ligantes asfálticos. Evaluación de asfaltos modificados en laboratorio con distintos polímeros. *Infraestructura Vial.*, 46 – 53.
- Lubl6y, E., *et al.* (2015). *Air Void Distribution of Asphalts Determined by Computed Tomography.*
- Reyes, F. (Ed.). (2015). Pavimentos. Materiales, Construcci6n y Dise1o. Bogot1, Colombia: Ecoe Ediciones.
- Taniguchi, S. (2008). *A Study of Longitudinal Cracking in Asphalt Pavement using CT Scanner.*
- Tinoco, Z., Alarc6n, J. (2017). *Estado del arte de las Mezclas Asf1lticas en M6xico. AMAAC.*
- Winslow, T. (Julio de 2013). *National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering* . Obtenido de <https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/tomograf%C3%ADa-computarizada-tc>
- Zhang, X., *et al.* (2011). *Numerical simulation of asphalt mixture based on three-dimensional heterogeneous specimen.*
- Zhang, Y., *et al.* (2015). *Using high-resolution industrial CT scan to detect the distribution of rejuvenation products in porous asphalt concrete.*

## 7. LISTA DE ILUSTRACIONES

<b>ILUSTRACIÓN 1.</b> IMAGEN RECONSTRUIDA TRIDIMENSIONAL DE LA MUESTRA DE SMA 19SMA-B2 UTILIZANDO EL CT DE RAYOS X.....	6
<b>ILUSTRACIÓN 2.</b> ESTRUCTURA GENERAL DE UN PAVIMENTO (2012). RECUPERADO DE <a href="http://www.pasionporvolar.com/pavimentacion-de-las-pistas-aereas/">HTTP://WWW.PASIONPORVOLAR.COM/PAVIMENTACION-DE-LAS-PISTAS-AEREAS/</a> .....	13
<b>ILUSTRACIÓN 3.</b> ESPÉCIMEN DE MEZCLA COMPACTADO.(2012). RECUPERADO: <a href="http://congresodevialidad.org.ar/congreso2012/conferencias-especiales/seminario_mezclas/paramo_poncino.pdf">HTTP://CONGRESODEVIALIDAD.ORG.AR/CONGRESO2012/CONFERENCIAS-ESPECIALES/SEMINARIO_MEZCLAS/PARAMO_PONCINO.PDF</a> .....	17
<b>ILUSTRACIÓN 4.</b> RELACIÓN ENTRE VMA Y LÍMITE DE ESPECIFICACIÓN PARA EL RANGO.....	19

## 8. GLOSARIO

- ∞ **ADITIVOS (asfaltos modificados).** - Productos, normalmente polímeros que se agregan a un cemento asfáltico, resultando un ligante de características reológicas mejoradas.
- ∞ **AGREGADO.** - También conocido como roca, o agregado mineral, es cualquier material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria, y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y el 95 por ciento, en peso, y entre el 75 y el 85 por ciento, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento.
- ∞ **ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.** - Tiene por objeto separar los materiales complejos y heterogéneos, como los materiales arcillosos, individualizando sus componentes, de acuerdo con la diferenciación que estos presentan entre sí respecto a las dimensiones de las partículas.
- ∞ **ARENA.** - Material resultante de la desintegración, molienda o trituración de la roca, cuyas partículas pasan por el tamiz de 5mm y son retenidas por el de 0.08mm.
- ∞ **ASFALTO.** - Material constituido por betunes naturales u obtenidos como residuo de la destilación del petróleo, de consistencia sólida, quebradiza, insoluble en agua que se utiliza como pavimento de caminos y como revestimiento impermeable de tejados y cubiertas.
- ∞ **CARPETA ASFÁLTICA.** - Es la capa superior de un pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento para los vehículos y se elabora con materiales pétreos y productos asfálticos.
- ∞ **CEMENTO ASFÁLTICO.** - Son asfaltos obtenidos del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo.
- ∞ **ELASTÓMERO.** - Material natural o artificial que tiene gran elasticidad. Se utiliza

para mejorar las características reológicas de los asfaltos.

- ∞ **EQUIVALENTE DE ARENA.** - Porcentaje de arena propiamente tal con respecto al total de arena y de impurezas coloidales floculadas, particularmente arcillosas, húmicas y eventualmente ferruginosas, presentes en un pétreo fino (bajo tamiz 5 mm).
- ∞ **ESPÉCIMEN.** - Muestra o ejemplar.
- ∞ **GRADO DE DESEMPEÑO.** - (*PG* por sus siglas en inglés “performance grade”). Se trata de un sistema de clasificación basado en condiciones climáticas con la finalidad de prevenir: roderas, grietas térmicas y grietas por fatiga.
- ∞ **INCLUSIÓN.** - Son cualquier material que esté dentro de los minerales. Diversas sustancias que se encuentran en el interior de los minerales.
- ∞ **MALLA.** - Cuadrilátero formado por cuerdas o hilos que se cruzan y se anudan en sus cuatro vértices, que constituye el tejido de la red.
- ∞ **PAVIMENTO.** - Estructura formada por una o más capas de materiales seleccionados y eventualmente tratados, que se colocan sobre la subrasante con el objetivo de proveer una superficie de rodadura adecuada y segura bajo diferentes condiciones ambientales y que soporta las sollicitaciones que impone el tránsito.
- ∞ **PÉTREOS.** - Son agregados de partículas minerales muy grandes y sin forma determinada que se encuentra en la naturaleza. Son materiales muy resistentes a las condiciones medioambientales.
- ∞ **PORO.** - Espacio que hay entre las moléculas de los cuerpos. Intersticio que hay entre las partículas de los sólidos de estructura discontinua.
- ∞ **TAMIZ.** - Instrumento formado por un aro una red tensada muy tupida que sirve para hacer pasar por él, sustancias en polvo y separarlas de las impurezas.
- ∞ **TOMOGRAFÍA.** - Se refiere a un procedimiento computarizado de imágenes por rayos X en el que se proyecta un haz angosto de rayos X a un objeto y se gira rápidamente alrededor del cuerpo, produciendo señales que son procesadas por la computadora de la máquina para generar imágenes transversales o “cortes” del cuerpo.
- ∞ **UMBRALIZACIÓN O THRESHOLD.** - Es el método más simple de segmentación. Separar regiones de una imagen, correspondientes a los objetos que queremos analizar.

Esta separación se basa en la variación de la intensidad entre los píxeles de objetos y los píxeles de fondo.

∞ **VACÍOS.** - Espacios entre las partículas de un pétreo.

∞ **VISCOSIDAD.** - Se denomina coeficiente de viscosidad a la razón entre el esfuerzo de corte aplicado y la tasa de corte; es una medida de la resistencia del líquido a fluir y, comúnmente, se denomina viscosidad. En el Sistema Internacional, la unidad de viscosidad es el pascal segundo (Pa s); en el sistema CGS, la unidad de viscosidad es el poise (dinas/cm<sup>2</sup>) y equivale a 0,1 Pa s. Frecuentemente, se usa como unidad de viscosidad el centipoise, que equivale a un milipascal por segundo (1 mPa \* s).

∞ **VOXEL.** - (Del inglés *volumetric pixel*) es la unidad cúbica que compone un objeto tridimensional. Esto quiere decir que, en cambio de un píxel, el cual posee las coordenadas *x* e *y*, el voxel también posee la coordenada *z*, que le aporta el dato de profundidad.

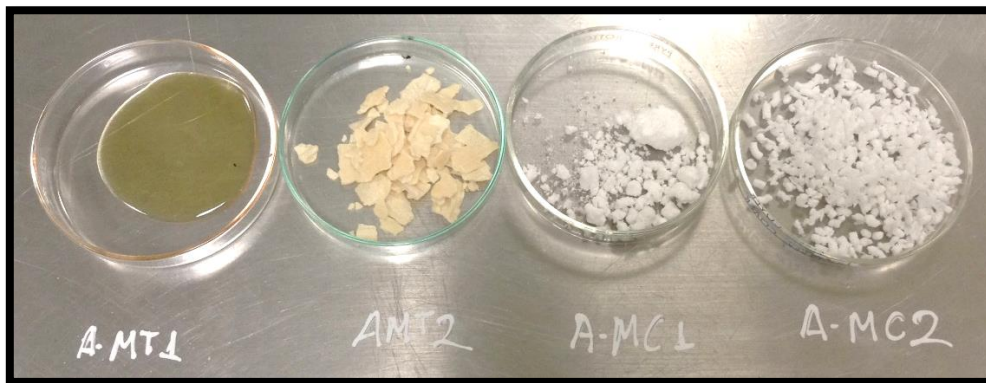
# ANEXOS

*“PORQUE LA SABIDURÍA ENTRARÁ EN TU CORAZÓN, Y EL  
CONOCIMIENTO SERÁ GRATO A TU ALMA”*

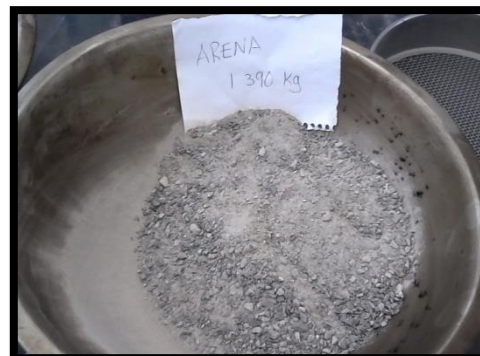
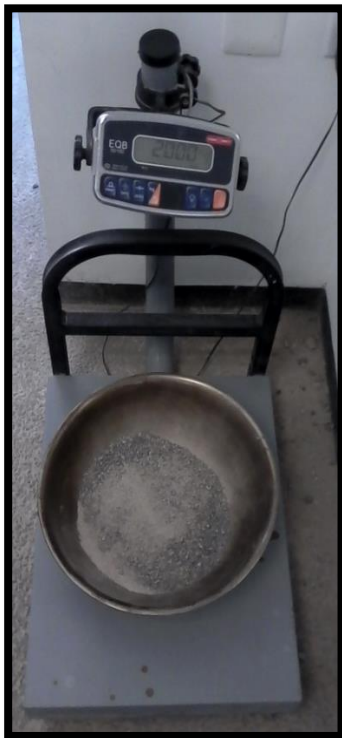
*Proverbios 2:10*

## 9. ANEXOS

### ADITIVOS QUÍMICOS PARA ASFALTOS



### ETAPA 1: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO



ETAPA 2: PROCESO DE MEZCLADO



ETAPA 3: PROCESO DE COMPACTACIÓN



## ETAPA 4: ANÁLISIS TOMOGRÁFICO

