

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA INTERNA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS A PARTIR DE TOMOGRAFÍAS COMPUTARIZADAS DE RAYOS – X

Armella María Ximena ¹, Orgaz Fernandez Jhonny ², Alvarez Alex E. ³

¹ Investigadora Junior Departamento de Vías – Carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias y Tecnología – UAJMS Tarija, Bolivia

² Docente Departamento de Vías – Carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias y Tecnología Universidad UAJMS Tarija, Bolivia.

³ Docente de la Universidad de Magdalena, Santa Marta, Colombia.

Correo electrónico: mvial2005@yahoo.es

RESUMEN

En el presente trabajo investigativo se analizan las estructuras internas de mezclas asfálticas a partir de Tomografías computarizadas de Rayos –X; enfocado al análisis de los vacíos y el contacto agregado-agregado, haciendo el uso de imágenes bidimensionales mediante el conteo de píxeles, empleando software de captura de imágenes (Radi ANT- DICOM) y de análisis (IMAGE-J) basado en programación JAVA. Se realizó el diseño de mezclas asfálticas en caliente, utilizando la metodología Marshall, por lo que se extrajeron muestras de materiales pétreos y asfálticos de plantas asfálticas y de acopio de materiales ubicados en nuestra región, los cuales fueron debidamente caracterizados en laboratorio. Una vez obtenido mediante diseño Marshall el porcentaje óptimo de asfalto y de agregados para una mezcla que cumpla con las exigencias de calidad para una carpeta asfáltica, se procede a compactar briquetas con los datos de diseño, para ser analizados mediante imagenología bidimensional (TC-RX).

A partir de las imágenes bidimensionales se determina el contenido de vacíos y el contacto agregado-agregado, y a través de estos datos se determina la relación existente entre estas variables, las cuales son determinantes para poder garantizar una carpeta asfáltica que cumpla con las exigencias de diseño requeridas, para brindar al usuario comodidad al transitar por ella.

Palabras Claves: mezclas asfálticas, tomografía, vacíos, agregado-agregado, Marshall, carpeta asfáltica.

ABSTRACT

This research paper discusses the internal structures of asphalt mixtures from CT scans - X-ray; focused to the analysis of gaps and contact agregado-agregado, making the use of two-dimensional

images by the count of pixels, using software from capture of images (Radi ANT - DICOM) and of analysis (IMAGE-J) based on JAVA programming. It is carried out from the design of mixtures asphalt in hot, using the Marshall methodology, which are extracted samples of materials of stone and asphalt from asphalt plants with materials located in our region. Which were properly characterized in laboratory. Once obtained the optimal percentage of asphalt and aggregates to a mix that meets the requirements of quality for an asphalt design Marshall, proceeds to be compacted briquettes with design data, to be analyzed by two-dimensional images (TC-RX).

From the two-dimensional images, empty content and added-added contact is determined, and through these data we determine the relationship between these variables, These results are decisive to ensure that an asphalt that meets the design requirements, and for user convenience to walk by it.

Key words: asphalt mixtures, tomography, empty, contact agregado-agregado, Marshall, asphalt binder.

INTRODUCCIÓN

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

Siempre nos hemos cuestionado qué es lo que realmente pasa dentro de una mezcla asfáltica, si realmente se cumplen los parámetros considerados en el diseño, en el caso de presentarse fallas en la carpeta asfáltica cuál fue la causa de

dicha falla; con el avance de la tecnología se ha logrado una mejora en las técnicas usadas para caracterización de materiales, debido a la necesidad de evaluar la validez de los métodos de diseño de mezclas asfálticas y el mejor conocimiento sobre los factores y mecanismos que afectan el comportamiento y respuesta de los materiales empleados.

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

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

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

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

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

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

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

El trabajo agregado-agregado dentro de las mezclas asfálticas define factores que influyen en la durabilidad y la funcionalidad que tendrán las mezclas asfálticas a lo largo de su vida útil, por lo que su observación es de importancia ya que posibilitaría determinar algunas causas y efectos de falla de las superficies de los pavimentos flexibles; esto sería posible mediante el uso de imágenes de la estructura interna de las mezclas asfálticas, con lo que podríamos modelar una estructura que cumpla con las especificaciones técnicas y de calidad que se necesitan.

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

MÉTODOS Y MATERIALES

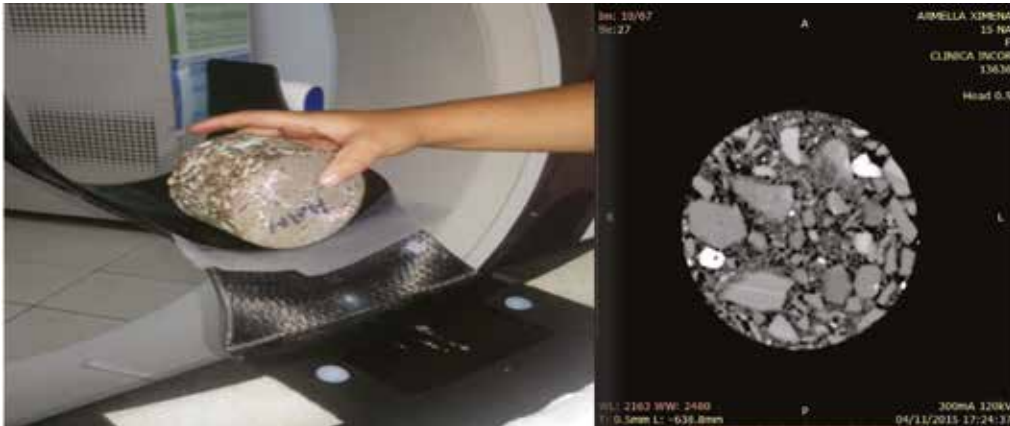
Para el análisis investigativo se diseñaron mezclas asfálticas haciendo uso de agregados pétreos provenientes de bancos regionales y cementos asfálticos 85/100 y 60/85; el último cemento asfáltico modificado con polímeros.

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

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

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

Figura 1. Imagen tomografía de la mezcla asfáltica



Análisis de Vacíos.-

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

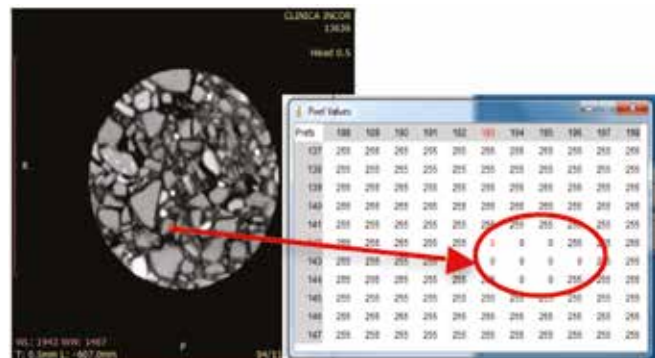
Entendiéndose por imagen binaria a la imagen que mantendrá solo dos códigos en su matriz de colores de pixeles 0 (identificado por el color negro, VACIOS) y 255 (identificado por el color blanco, AGREGADOS DE LA MEZCLA); imagen en blanco y negro .

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

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

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

Figura 2. Vacíos observados por tomografía



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

• Análisis del porcentaje de vacíos en el agregado mineral

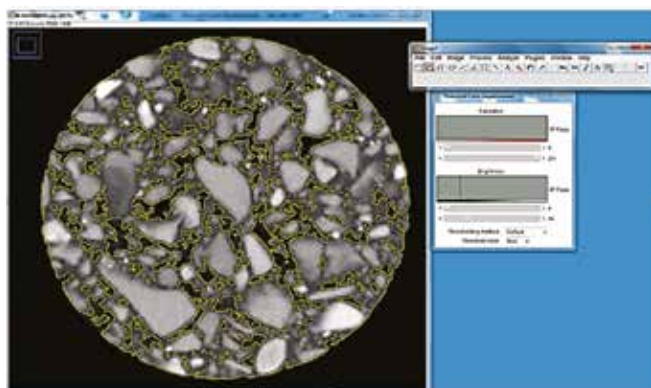
De igual modo que en el porcentaje de vacíos, la determinación del porcentaje VAM se realiza mediante la lectura binaria (imágenes en blanco y negro) de las imágenes tomografías.

En base al procesamiento de las imágenes en programación binaria, habiendo realizado el análisis de cada imagen del contraste que éstas

presentaron en su matriz de color se determinó que el valor de programación para el conteo de pixeles que se encuentran representando a los vacíos del agregado mineral (vacíos y vacíos llenos de asfalto) es 54 (denominado valor límite VAM) y 255 (AGREGADO), debido a la variación de la densidad por la presencia de asfalto.

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

Figura 3. Determinación del porcentaje VAM



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

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

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

• Análisis contacto agregado-agregado

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

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

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

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

La determinación del valor 62 es recomendado por el autor del método que nos permite validar el dato obtenido, ya que este es el valor medio de los valores analizados en cada imagen obtenida para cada banco analizado, cuyo tamaño máximo de agregado es el de ¾".

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

Figura 4. Análisis Contacto Agregado - Agregado

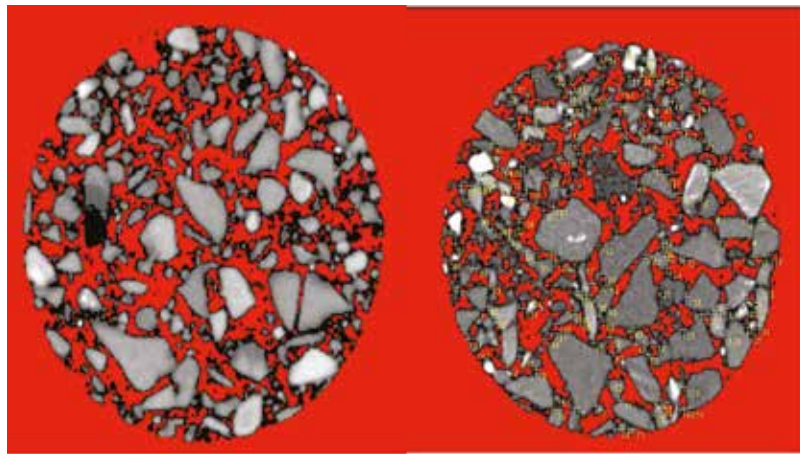
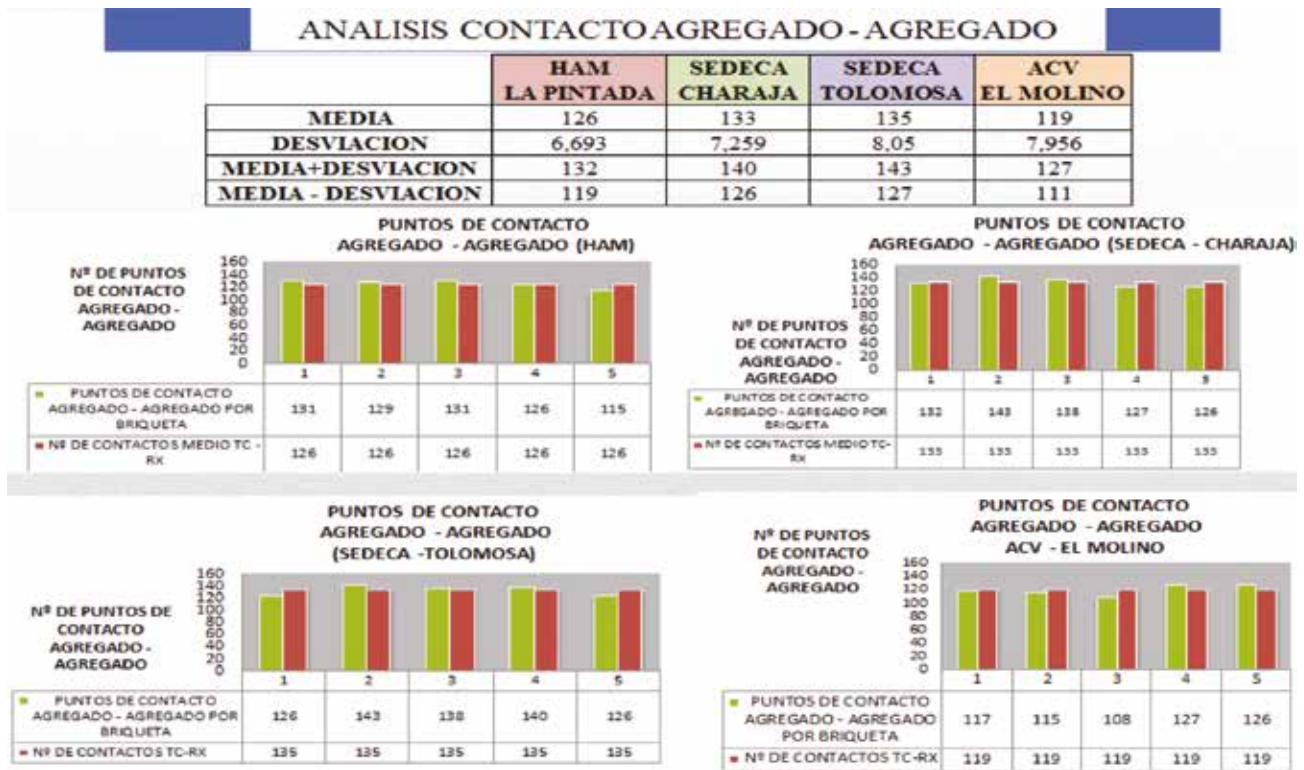


Figura 5. Análisis Cuantitativo “Contacto Agregado – Agregado”



RESULTADOS:

• **BRIQUETAS**

Porcentaje de Vacíos

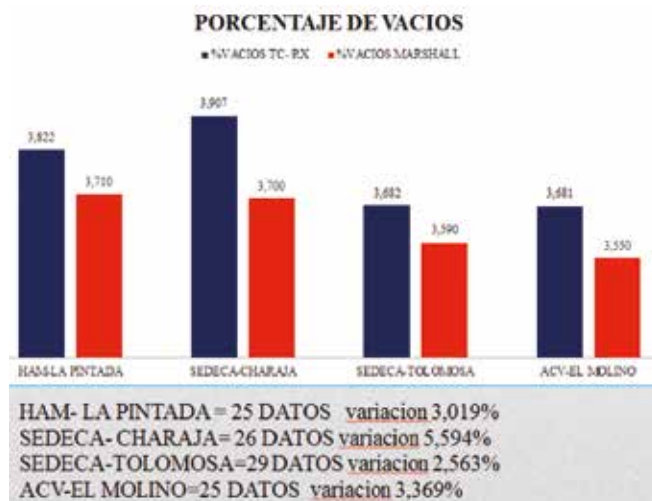
El porcentaje de vacíos debe encontrarse dentro de un rango no menor al 3% y no mayor al 5% según norma.

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

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

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

Figura 1. Porcentaje de Vacíos



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

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

Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM)

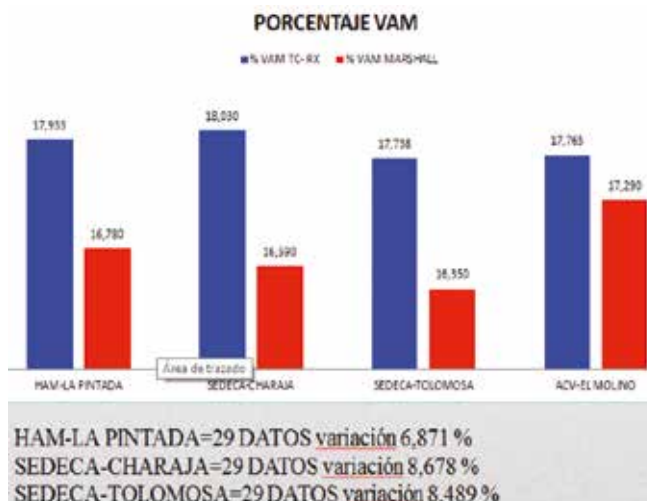
Este porcentaje está en función del tamaño máximo nominal de agregado utilizado dentro de la mezcla asfáltica.

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

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

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

Figura 2. Porcentaje VAM de mezclas analizadas



Se puede observar que todos los valores TC-RX se encuentran por arriba del valor mínimo especificado por norma que es de 14,000 % para VAM, debido a que en todos los casos se usa agregado con tamaño máximo nominal de ¾".

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

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. Contacto agregado-agregado de mezclas analizadas



Se puede observar que los puntos de contacto para una mezcla asfáltica elaborada con los porcentajes óptimos de cemento asfáltico los

puntos de contacto se encuentran por encima de los 100 puntos de contacto.

Relacionando VAM vs. VACIOS

Se observa que dentro de la estructura interna de la mezcla asfáltica a menor porcentaje de vacíos menor porcentaje de vacíos del agregado mineral presenta y viceversa, por lo que se ajusta a un modelo lineal de pendiente positiva (recta ascendente).

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

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

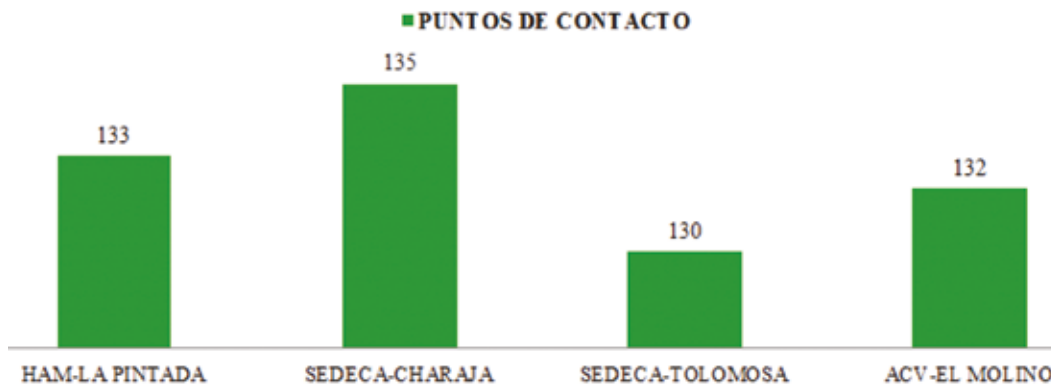
Relacionando las variables VAM y VACIOS se determina que estas son proporcionales entre sí a medida que aumenta el porcentaje de vacíos aumenta el porcentaje de vacíos del agregado mineral.

Figura 4. Relación de VAM vs. VACIOS de los 4 puntos de muestreo



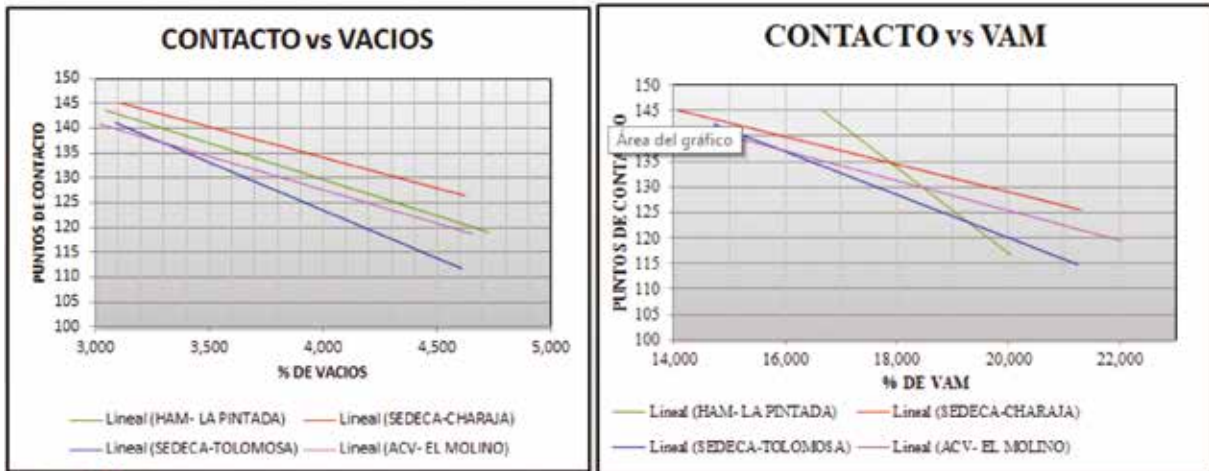
Relacionando Contacto Agregado vs Vacíos Observando cada banco de datos analizado, relacionando las variables contacto agregado-agregado y porcentaje de vacíos, se determina que a menor porcentaje de vacíos, mayor puntos de contacto entre agregados presenta la mezcla asfáltica o viceversa, tanto para mezclas preparadas con cemento asfáltico convencional o cemento asfáltico modificado.

Figura 5. Relación de Agregado vs. Vacios de los 4 puntos de muestreo



El número de contactos agregado-agregado para mezclas densas en ningún caso es menor a 100 pero no mayor a un valor promedio de 140 puntos para asfaltos 85/100 y 60/85, un valor menor a 100 significa que existe una película demasiado gruesa por lo que presentaría ondulaciones, ahuellamientos; y mayor a 140 una película demasiado delgada por lo que presenta segregación de los agregados, afloramientos y exudaciones; en ambos limites, la trabajabilidad de la mezcla se ve afectada.

Figura 6. Relación de Contacto vs. Vacíos - Contacto vs. VAM de los 4 puntos de muestreo



Relacionando Contacto Agregado vs VAM

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

Relacionando el contacto agregado-agregado y el porcentaje de vacíos tanto VAM como VACIOS se determina que a mayor cantidad de puntos de contacto menor porcentaje de vacíos presenta la mezcla asfáltica.

A mayor contacto entre agregados la mezcla constituye una estructura cerrada siendo esta poco o nada permeable, debido al bajo porcentaje de vacíos, lo cual representaría que la mezcla también presentaría problemas de dilatación y contracción, los efectos de la temperatura.

Porcentaje VAM

• **NÚCLEOS**

Se realizó el análisis de núcleos para poder verificar si los parámetros de diseño en campo satisfacen las especificaciones normadas.

Porcentaje de Vacíos

Figura 7. Porcentajes de vacíos en núcleos

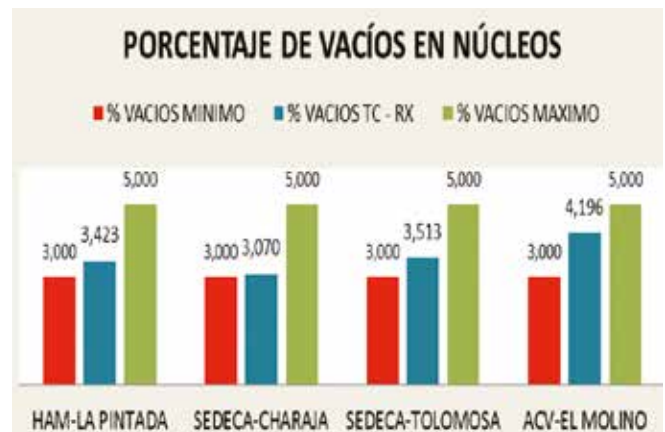
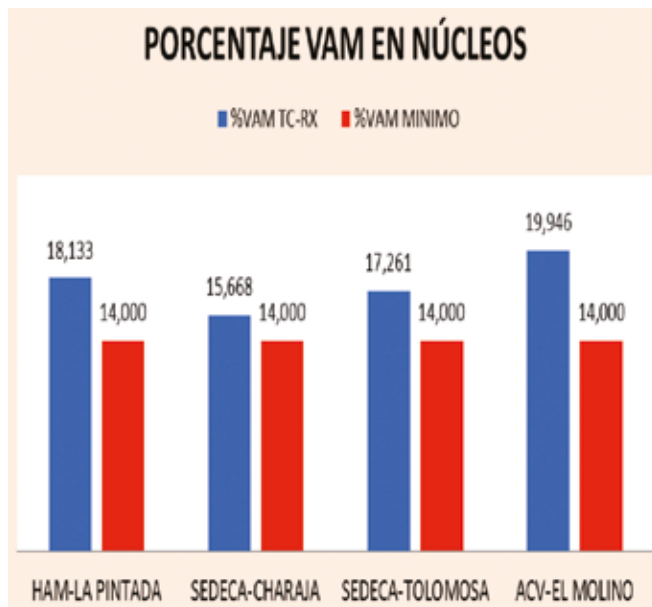


Figura 8. Porcentaje VAM en Núcleos



Contacto Agregado-Agregado

Figura 9. Contacto Agregado de Núcleos



CONCLUSIONES

Se verifica que los valores de porcentaje de vacíos en mezclas asfálticas densas efectivamente se encuentran entre 3 y 5%.

Se Determinán valores con TC-RX entre 3.5% – 4 %, en mezclas compactadas en condiciones ideales.

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

Se verifica que el porcentaje de vacíos del

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

Relacionando las variables VAM y VACIOS se determina que éstas son proporcionales entre sí a medida que aumenta el porcentaje de vacíos aumenta el porcentaje de vacíos del agregado mineral.

El número de contactos agregado-agregado para mezclas densas son menor a 100 pero no mayor a 140 puntos para asfaltos 85/100 y 60/70, un valor menor a 100 significa que existe una película demasiado gruesa por lo que presentaría ondulaciones, ahuellamientos; y mayor 140 una película demasiado delgada por lo que presenta segregación de los agregados y exudaciones; en ambos límites la trabajabilidad de la mezcla se ve afectada.

Relacionando el contacto agregado-agregado y el porcentaje de vacíos se determina que a mayor contacto entre agregados, menor porcentaje de vacíos se presenta.

Relacionando el contacto agregado-agregado y el porcentaje VAM se determina que a mayor contacto entre agregados, menor es el valor del porcentaje de vacíos del agregado mineral que presenta la mezcla asfáltica.

A mayor contacto entre agregados, la mezcla constituye una estructura cerrada siendo ésta poco o nada permeable, debido al bajo porcentaje de vacíos, lo cual representaría que la mezcla también presentaría problemas de dilatación y contracción, por efecto de temperatura.

BIBLIOGRAFÍA

ADMINISTRADORA BOLIVIA DE CARRETERAS- Manual de Ensayos de Suelos y Materiales / Asfaltos, Bolivia.

ÁLVAREZ, Allex E. - XIX Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, Revista Primera Edición 2013, Bogotá – Colombia.

BARIANI BERNUCCI LEIDI, GORETTI DA MOTTA LAURA MARÍA, PEREIRA CERATTI JORGE AUGUSTO, BARBOSA SOARES JORGE - Pavimentación Asfáltica, Formación Básica para Ingenieros. 4ta. Reimpresión – ABEDA, Río de Janeiro 2008.

CRESPO VILLALAZ, Carlos - Vías de Comunicación Volumen II. 3ra Edición, México 2004.

HERNÁNDEZ SAMPIERI ROBERTO, FERNÁNDEZ COLLADO CARLOS, PILAR BAUTISTA LUCIO - Metodología de la Investigación. 4ta. Edición 2006, México D.F.

JOSEPHIA SANTOS RICHARD - Agregado Grueso en Caliente (Método Marshall "ASTM D1559"), Primera Edición, 2009, Oruro – Bolivia

MONTEJO FONSECA ALFONSO - Ingeniería de Pavimentos Evaluación Estructural, Obras de Mejoramiento y Nuevas Tecnologías, Tercera edición 2006, TOMO2, Bogotá-Colombia

RICO RODRÍGUEZ ALFONSO - La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres Volumen II, Editorial Limusa, Edición 1996, México D.F

THE ASPHALT INSTITUTE - Manual del Asfalto. 4ta. Reimpresión 1973, traducido por Manuel Velázquez, España; TRIOLA MARIO – Estadística, Décima Edición 2009, México D.F

WALPOLE, RONALD E., MYERS, RAYMOND H., MYERS SHARON L. - Probabilidad y Estadística para Ingenieros. 6ta. Edición en Español, México D.F. 1999.