# Técnicas de microscopía y petrografía para caracterizar materiales de carreteras

Gloria I. Beltrán C.
*Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C.*

ABSTRACT
In order to evaluate the internal structure of asphalt concrete for road use, identifying structural features associated with its performance, petrographic techniques are addressed in this work, using optical and electron microscopes mainly. Asphalt concrete samples were made under controlled laboratory conditions with different bitumen contents and compaction levels, from which thin sections were prepared and polished blocks for observation and examination under the microscope; aggregates were analyzed previously with optical microscopy and X-ray fluorescence. As a result, important elements of materials and asphalt concrete were established : significant structural features, physical characterization, quality assessment,and chemical-mineralogical characterization of aggregates. From these analyses, it can be concluded about the wide potential of these techniques for evaluation and quality control during production of asphalt mixtures, construction processes and during service life on pavements.

RESUMEN
Con el propósito de abordar métodos que permitan complementar la evaluación de materiales y mezclas asfálticas, en esta investigación se recurre a la aplicación de técnicas petrográficas y mineralógicas para analizar concretos asfálticos compactados de preparados bajo condiciones controladas en laboratorio, con contenidos de asfalto diferentes; se elaboraron muestras en bloques pulidos y secciones delgadas, los cuales se analizaron por métodos de microscopia óptica y electrónica incluyendo toma y análisis de imágenes; los agregados pétreos se analizaron previamente con microscopía óptica y fluorescencia de rayos X. Como resultado, se obtuvo la caracterización química-mineralógica de agregados y la caracterización de mezclas asfálticas, desde el punto de vista de su estructura interna, rasgos estructurales identificables, propiedades físicas y de calidad. Los análisis realizados, permiten concluir acerca del gran potencial de aplicación de las técnicas mencionadas para la evaluación y control de calidad de mezclas asfálticas, en los procesos de producción, construcción y durante su vida útil en pavimentos.

## 1 INTRODUCCIÓN

El comportamiento y desempeño de una mezcla asfáltica compactada, o concreto asfáltico, dependen en gran parte del arreglo estructural que logran los componentes, es decir agregados pétreos, asfalto y vacíos, dentro de la mezcla. Este arreglo se reporta comúnmente como la estructura interna y depende, entre otros factores, del método y nivel de compactación, la calidad y cantidad de asfalto, la temperatura, propiedades de los agregados como gradación, tipo, composición, forma y distribución, las cuales gobiernan las características de resistencia y la respuesta anisotrópica de la mezclas.

En virtud de la gran cantidad de variables que intervienen, la evaluación del arreglo estructural del concreto asfáltico se torna compleja; las pruebas que se realizan de manera tradicional y rutinaria para el diseño o control de calidad, ignoran este aspecto y la mayoría de los modelos mecánicos utilizados, asumen que la mezcla asfáltica es un compuesto homogéneo e isotrópico. Surge entonces la necesidad de considerar metodologías para evaluar rasgos estructurales que tengan algún grado de incidencia en el desempeño de mezclas asfálticas, aplicables al medio colombiano.

En este trabajo se explora la factibilidad de realizar análisis petrográficos sobre muestras de concretos asfálticos. Para esos fines, el Grupo de Investigación en Geotecnia de la Universidad Nacional -GIGUN, desarrolló el proyecto de investigación titulado "Análisis de la aplicación de técnicas de microscopia y de rayos X para el estudio de la estructura interna de mezclas asfálticas", financiado por la División de Investigación de la Sede Bogotá. En el marco de este proyecto se evaluaron muestras producidas en laboratorio bajo condiciones controladas, con diferentes contenidos de asfalto y niveles de compactación; en los análisis se utilizaron equipos de microscopía óptica y electrónica, complementadas con Fluorescencia de rayos X para caracterizar agregados pétreos y mezclas asfálticas utilizados para proyectos viales en la ciudad de Bogotá.

En este trabajo se presentan algunos de los resultados obtenidos en la investigación mencionada, en cuanto a caracterización física, mineralogía, de calidad y rasgos estructurales identificables en los concretos asfálticos. Para efectos de contextualización, inicialmente se presentan los investigaciones previas que han abordado la evaluación del arreglo estructural de concretos asfálticos.

## 2 INVESTIGACIONES PREVIAS

Existen varios antecedentes de investigaciones a nivel mundial, donde se han efectuado intentos para evaluar la estructura interna de mezclas asfálticas, ya sea para efectos de caracterización o para establecer relaciones entre rasgos estructurales y comportamientos. La mayoría de estos trabajos utilizan herramientas desarrolladas para análisis de imágenes.

Ishai y Gellber (1982) encontraron que las propiedades de los agregados obtenidas en ensayos sobre muestras de concretos, se relacionaban estadísticamente con el ahuellamiento en las mezclas. En este mismo sentido, Barksdale et al. (1992), evaluaron el efecto del agregado sobre el ahuellamiento y fatiga de las mezclas asfálticas, usando técnicas de análisis de imágenes para medir las propiedades de los agregados.

Monismith (1992) concluyó que la estructura interna del concreto asfáltico, juega un papel significativo en el desempeño de la mezcla colocada en obra, en cuanto a su resistencia y eventuales patologías como ahuellamiento, fracturas por fatiga y por temperatura.

Por su parte, Yue et al. (1995) obtuvieron información cuantitativa sobre la distribución y forma de las partículas de agregado, determinaron la estructura interna y cuantificaron la anisotropía en las mezclas asfálticas, usando la técnica de análisis "Imaging". Se encontró que la diferencia entre las propiedades de una misma mezcla compactada usando diferentes métodos, es atribuida a la diferencia en la estructura interna de la misma y, en particular, a la distribución y orientación de los agregados.

Las investigaciones efectuadas por Masad et. al, entre 1998 y 2003, permitieron importantes desarrollos como el "Aggregate Imaging System" (AIMS); los análisis arrojan los siguientes resultados relevantes: se cuantificó y comparó la estructura interna de concretos asfálticos preparados con diferentes energías de compactación, determinando la orientación de los agregados y la distribución de los vacíos con aire en la mezcla, con técnicas de procesamiento de imágenes digitales. La técnica también permitió verificar la habilidad que tiene el compactador giratorio para superpave de reproducir las condiciones de compactación in situ. En el año 2002 este grupo usó tomografía de rayos X junto con las técnicas de análisis de imagen para caracterizar la distribución de tamaños de vacíos a profundidades diferentes en muestras de concreto asfáltico.

Con la aplicación de todas estas técnicas, se concluyó que entre las diferentes propiedades del agregado, la textura tiene la correlación más fuerte con la resistencia al ahuellamiento de la mezcla, la cual aumenta exponencialmente con la rugosidad.

El Instituto de Transporte de Texas relacionó el comportamiento de mezclas asfálticas con un índice de textura de agregado, determinado mediante "Imaging". También correlacionaron las profundidades de rodera, con la textura medida con el AIMS del agregado grueso utilizado en el estudio NCHRP (Kandhal y Parker 1998).

Janoo (1998), logró determinar propiedades físicas de agregados, como angulosidad, forma, rugosidad, y Poblete (2001) realizó caracterización morfológica. Ambos utilizaron microscopios electrónicos.

Wang et al (2001), estudió la distribución espacial de vacíos de aire en diferentes mezclas, con gradaciones muy finas, finas y gruesas; también cuantificó el deterioro en términos de un área especifica de vacíos de aíre y la distancia promedio entre los daños superficiales usando imágenes de tomografía de rayos X de secciones transversales en diferentes orientaciones.

Agamalian et al (2002) utilizaron la difracción de Rayos X para la determinación de esfuerzos residuales, micro deformaciones y propiedades micro estructurales, a partir del espaciamiento inter laminar de los cristales que componen los agregados.

Gordon D. et. al (2004), encontraron que el método de compactación tiene una influencia significativa sobre la distribución direccional de los componentes y sus contactos, y que pese a llevar un espécimen a dos condiciones idénticas de compactación en campo y laboratorio, su comportamiento mecánico varía ampliamente.

En Bogotá, Colombia, en el marco del Convenio IDU-Universidad Nacional para el seguimiento a vías con pólizas de estabilidad vigente, en el año 2003 se utilizaron técnicas petrográficas para el análisis de mezclas asfálticas colocadas en una de las vías troncales del sistema de transporte público de pasajeros "Transmilenio". Se estableció la mineralogía de los agregados, e identificaron problemas asociados con: la presencia de partículas planas o alargadas orientadas dentro de la mezcla; presencia de estructuras laminares, que pudiesen afectan la durabilidad y estabilidad de las mezclas; así mismo se identificaron deficiencias en la adherencia asfalto-agregado originados por la presencia de materiales de origen aluvial, con formas redondeadas y con poca rugosidad; vacíos en las mezclas, asociados con deficiencias en los procesos de compactación; micro-fisuración de agregados (areniscas arcillosas, liditas y Shales), que manifiestan zonas de debilidad. Este es uno de los casos típicos donde los análisis petrográficos resultan de utilidad para complementar la evaluación de concretos asfálticos de vías en servicio.

Los anteriores antecedentes, sirvieron de base para establecer una metodología inicial de trabajo, iniciando así una investigación petrográfica de concretos asfálticos acorde con los avances tecnológicos disponibles en nuestro medio. Las principales actividades desarrolladas para efectos de este trabajo, se refieren a caracterización de agregados, elaboración de núcleos de mezcla asfáltica compactada, análisis petrográficos y mineralógicos incluyendo preparación de muestras, toma y análisis de imágenes.

## 3 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS

Los agregados utilizados para las mezclas asfálticas proceden de dos fuentes de materiales que producen 4 tipos de agregados: la fuente-I produce arenas finas y de trituración de origen ígneo y metamórfico y la fuente-II provee arenas de trituración y gravas de origen sedimentario.

De cada uno de los agregados, se separaron las fracciones por tamaños, para elaborar una sección delgada, SD de cada fracción; en total se elaboraron 18 secciones SD, tal como se indica en la tabla 1.

Tabla 1: Secciones delgadas elaboradas

| Fuente | Origen | Material | Secciones delgadas |
|---|---|---|---|
| I | Ígneo y | Arena de | 5 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | Metamórfico | trituración | |
| I | Ígneo y Metamórfico | Arena fina | 6 |
| II | Sedimentario | Gravas s | 1 |
| II | Sedimentario | Arena de trituración | 6 |

Para la determinación de propiedades macroscópicas como fracturas, textura, tamaño de poro, a partir de las SDs. se utilizaron microscopios ópticos o de luz transmitida, como el mostrado en la figura 1, cuyo análisis se basa en la ampliación de la imagen de un objeto mediante el uso de lentes convergentes; la sonda en estos microscopios es la radiación visible que ilumina la muestra a estudiar.

Figura 1. Microscopio Óptico

Como complemento, se realizaron análisis con espectroscopio de Fluorescencia de Rayos-X a los cuatro tipos de agregados, obteniendo análisis semi-cuantitativos de la composición elemental. Para esos fines, se redujo una muestra de cada uno de los agregados, a tamaños que pasan por el tamiz No 100, y se prepararon pastillas como la mostrada en la figura 2.

Figura 2 Muestra en pastilla para análisis de RX

El análisis se realizó en el espectrómetro mostrado en la figura 3, compuesto una fuente de radiación primaria (tubo de RX), un detector de radiación y el software para análisis. La emisión de RX de los diferentes elementos presentes en una muestra permite obtener espectros que indican las correspondientes concentraciones.

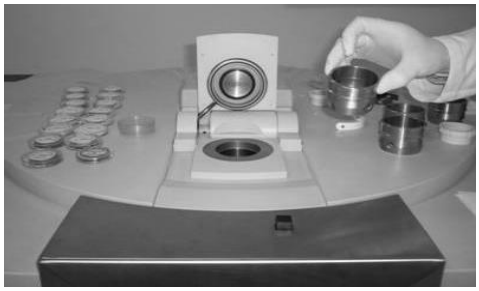


Figura 3. Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X

De los análisis petrográficos y de RX, se obtuvieron los resultados descritos a continuación.

La roca principal del agregado de la fuente I, corresponde a ígnea de tipo volcánico de composición básica, es decir con pobre contenido de cuarzo; adicionalmente hay pequeñas cantidades de roca metamórfica y en menor proporción roca sedimentaria, según se aprecia en la tabla 2.

Tabla 2. Composición de agregados – Fuente I.

| Roca fuente | Arena trituración | Arena fina |
|---|---|---|
| Andesita-Basalto | 68.0% | 54.0% |
| Andesita | | 21.0% |
| Toba | | 17.0% |
| Basalto | 7.0% | 4.0% |
| Cuarzomonzonita | 7.0% | |
| Monzodiorita, ortoneis, esquisto y granofelsa | 14.5% | |
| Cuarcita | 3.5% | 4.0% |

En la figura 4 se puede apreciar los espectros de los materiales de la fuente I, cuya similitud es evidente, dada su procedencia común (volcánico), con porcentajes de SiO2 menores de 65%.

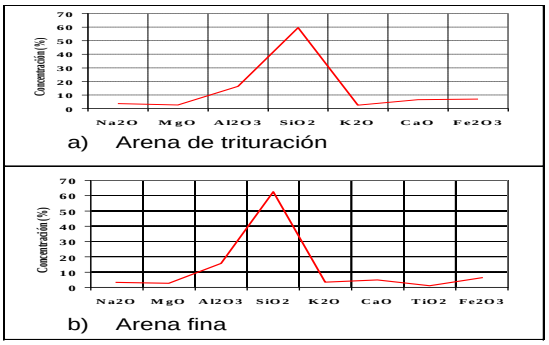



Figura 4. Composición mineralógica - Fuente I

Por su parte, los agregados provenientes de la fuente II son sedimentarios en su mayoría, con una menor proporción de metamórfico, tal como se ve en la tabla 3.

En el análisis petrográfico del agregado, se identifica la alta proporción de cuarzo que es el mineral principal que compone las rocas sedimentarias. La presencia de

microfisuras es relativamente pequeña y la forma predominante de los granos es angular y subangular.

Tabla 3. Composición de agregados – Fuente II.

| ROCA FUENTE | Arena trituración | Gravas |
|---|---|---|
| Arenisca | 86.0% | 60% |
| Arenisca arcillosa | | 30% |
| Limolita | 4.5% | 5% |
| Arcillolita Limosa | 2.5% | 5% |
| Metarenisca | 2.5% | |
| Cuarcita | 4.5% | |

En la Figura 5 se aprecian los espectros de los materiales de la fuente II, cuyo comportamiento similar confirma que proceden del mismo tipo de roca, y, por su elevado contenido de SiO2, mayor de 90% debido al cuarzo, se evidencia que son rocas de tipo sedimentario. En general, estos agregados se caracterizan por presentar formas angulares a subredondeadas.

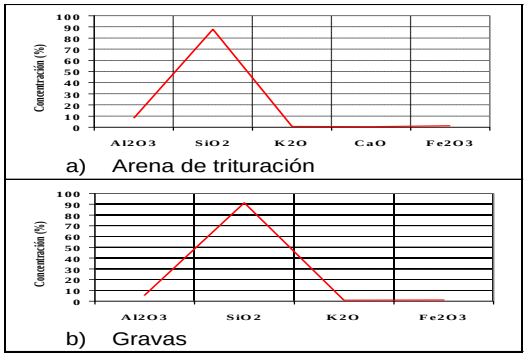



Figura 5. Composición mineralógica - Fuente II

Este experimento resulta coherente con el análisis petrográfico; sin embargo, en la práctica conviene condicionarlo a casos en los cuales el reconocimiento de los agregados no se pueda obtener mediante otros métodos o se requiera conocer con rigurosidad el contenido de los diferentes óxidos y elementos.

## 4 CARACTERIZACIÓN DE CONCRETO ASFÁLTICO

En la producción de mezclas asfálticas se utilizó la fórmula de trabajo y los materiales (agregados y asfalto) y suministrados por una de las empresas productoras de mezclas asfálticas en Bogotá. Los agregados pétreos se combinaron con las proporciones indicadas en la tabla 4, para producir una granulometría ajustada dentro de los requisitos establecidos para mezclas densas en caliente.

Tabla 4: Proporción de agregados en las mezclas

| Fuente | Material | % |
|---|---|---|
| I | Arena de trituración | 9.5 |
| I | Gravas | 41.5 |
| II | Arena finas | 15.5 |
| II | Arena de trituración | 33.5 |

Para la preparación en laboratorio de núcleos de mezcla asfáltica compactada (ver figura 6), se siguió el procedimiento establecido para el diseño de mezclas por el método Marshall, utilizando cinco porcentajes de asfalto y tres energías de compactación.

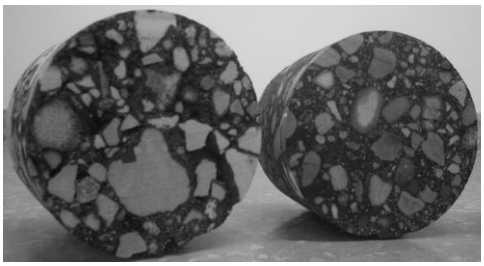


Figura 6. Núcleos de concreto asfáltico.

Se prepararon tres muestras por cada % de asfalto, para un total de 45 núcleos; dos de ellos se destinaron a pruebas rutinarias de caracterización y ensayos de estabilidad y flujo, y un núcleo se destinó para análisis petrográficos, es decir 15 núcleos, numerados según se indica en la tabla 5. Dentro de los alcances de este trabajo, solo se reportan las actividades y los resultados logrados en los análisis petrográficos.

Tabla 5: Identificación de núcleos de concreto asfáltico

| % de Asfalto | Compactación alta | Compactación media | Compactación baja |
|---|---|---|---|
| 5.0 | 1 | 6 | 11 |
| 5.5 | 2 | 7 | 12 |
| 6.0 | 3 | 8 | 13 |
| 6.5 | 4 | 9 | 14 |
| 7.0 | 5 | 10 | 15 |

A cada núcleo se le practicaron tres cortes como se indica en la Figura 7; las partes A y C se destinaron para elaborar secciones delgadas (una en sentido vertical y otra horizontal) y de la parte B se extrajeron bloques pulidos. Se obtuvieron en total 30 secciones delgadas y 15 bloques pulidos.

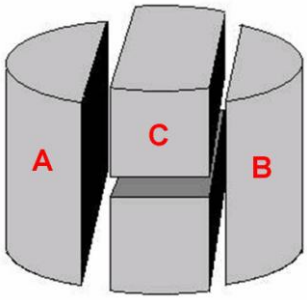


Figura 7. Esquema de corte de cada núcleo

Cada una de las secciones delgadas se dividió en campos de 5 $mm^2$ y su análisis petrográfico se realizó mediante microscopios ópticos. La caracterización morfológica de propiedades de interés a menor escala, requirió el uso de microscopía electrónica de barrido y microanálisis de RX (figuras 8y 9); éstos tienen mayor poder resolutivo y pueden mostrar estructuras muy pequeñas, dado que para iluminar el objeto se utiliza un haz de electrones cuya longitud de onda es mucho menor que la de la luz.

Figura 8. Microscopio Electrónico de Barrido

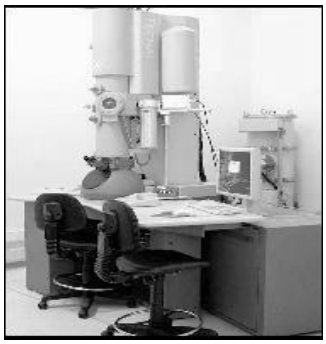


Figura 9. Microscopio Electrónico de Transmisión

Por su parte, los bloques pulidos se dividieron en campos de 1 $cm^2$ ayudado por una grilla de acetato (ver figura 10) y mediante un estéreo-microscopio, se realizó el análisis detallado. Los bloques pulidos representan muestras de mano para realizar análisis macroscópicos, introductorio al análisis de secciones delgadas, pues permiten apreciar por completo la estructura interna. Durante los análisis en microscopio y estereoscopio, se realizó la toma de imágenes con cámara fotográfica, para registrar y documentar las características más sobresalientes observadas.

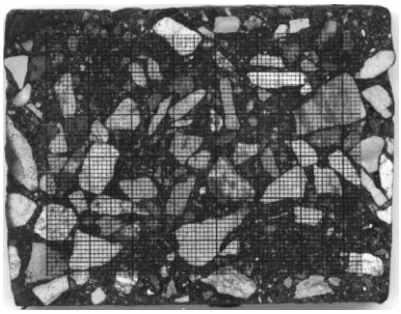


Figura 10. Análisis sobre boques pulidos

La combinación de análisis con estas herramientas, permitió identificar proporciones de agregado, asfalto y vacíos en la mezcla, la gradación, textura, forma, mineralogía y grado de meteorización de los agregados, el grado de interacción que logra el asfalto con los agregados, eventual segregación de la mezcla, apariencia del mastic, microfisuras, influencia de la compactación, proporción, distribución y tipos de vacíos presentes entre otros.

## 4.1 Microfisuras

En el análisis petrográfico de las mezclas asfálticas se identificaron varios tipos de microfisuras presentes en los agregados, tal como se ilustra en la figura 11; la mayoría de ellas se encontraron rellenas de asfalto.

Estos rasgos estructurales se observaron en todas las secciones delgadas analizadas, es decir se encuentran en cualquiera de los núcleos sin preferencias en el nivel de compactación o contenido de asfalto. Aun así, la proporción de agregados fisurados solo alcanzó el 5% en el caso más extremo.

## 4.2 Naturaleza de los contactos asfalto - agregado

La interacción agregado – asfalto es función de la forma y textura superficial que presentan los agregados, así como de las características de flexibilidad del asfalto. En la figura 12 se describen los principales hallazgos en la naturaleza de los contactos.

Las areniscas cuarzosas y los granos de chert presentan gran variedad de contactos, desde aquellos con bordes muy rugosos hasta relativamente lisos; en general se encuentran muy bien ligados con el mastic. Por su parte, los agregados de origen ígneo y metamórfico presentan bordes rectos o semi rectos, pero con buena adherencia, al igual que fragmentos de cristales de piroxenos y anfiboles embebidos en el asfalto. Algunos agregados con bordes rectos exhiben vacíos alargados e irregulares alrededor, con pequeños puentes de asfalto uniendo las partículas; esto se observó en agregados sedimentarios e ígneos.

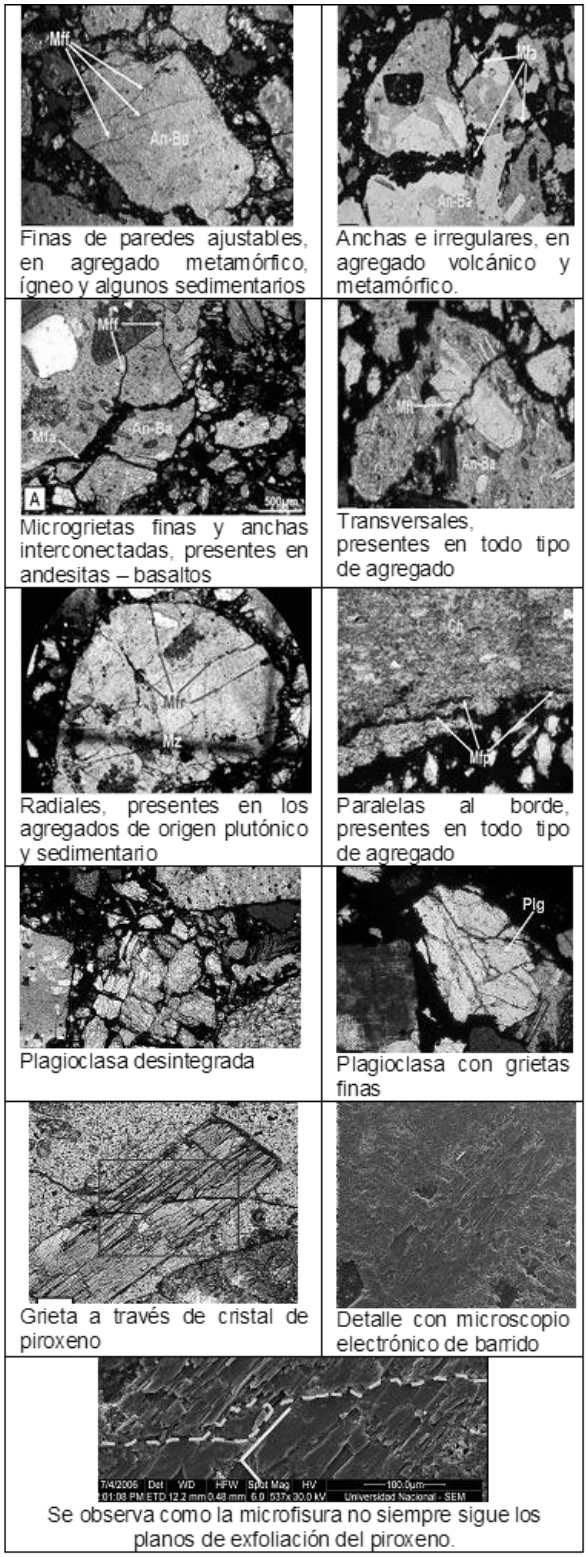



Figura 11. Características de microfisuras observadas

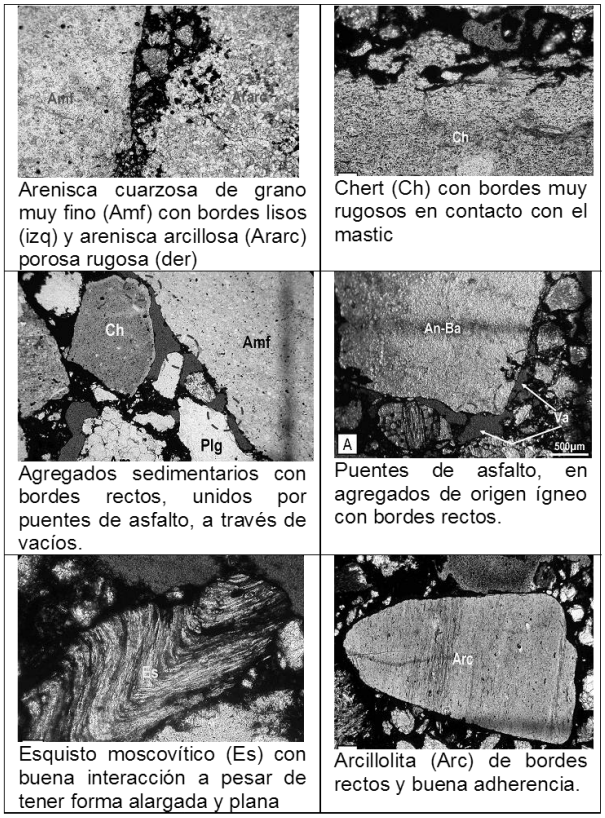



Figura 12. Contactos asfalto-agregado

## 4.3 Distribución de Vacíos en la Mezcla

En general los vacíos presentan diferentes formas y tamaños y se observaron localizados en todos los sectores de las secciones (ver figura 13).

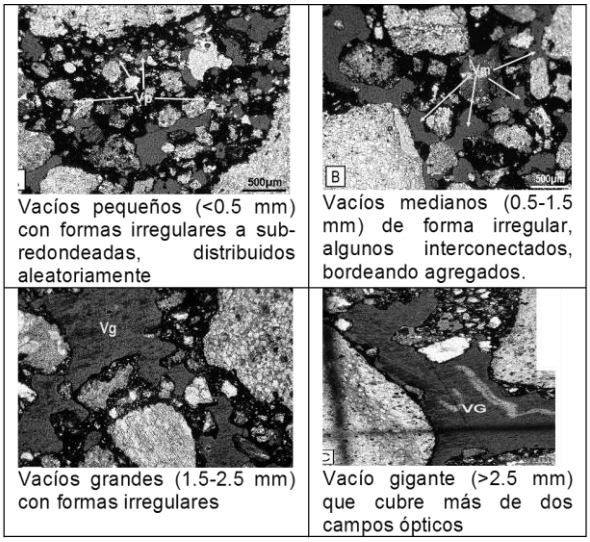



Figura 13. Tipos de vacíos encontrados

Estos vacíos se cuantificaron de acuerdo a la cantidad y clase presente en los diferentes campos,

encontrando que los más frecuentes son los vacíos pequeños, con una proporción promedio de 12 %.

4.4 Distribución de los agregados dentro de la mezcla

En términos generales, casi no se encontraron agregados en contacto directo, y aunque se encontraron situaciones de buena distribución de los agregados dentro de la mezcla, también fue común se evidenciar la segregación por sectores; el resumen de los hallazgos, se ilustra en la figura 14.

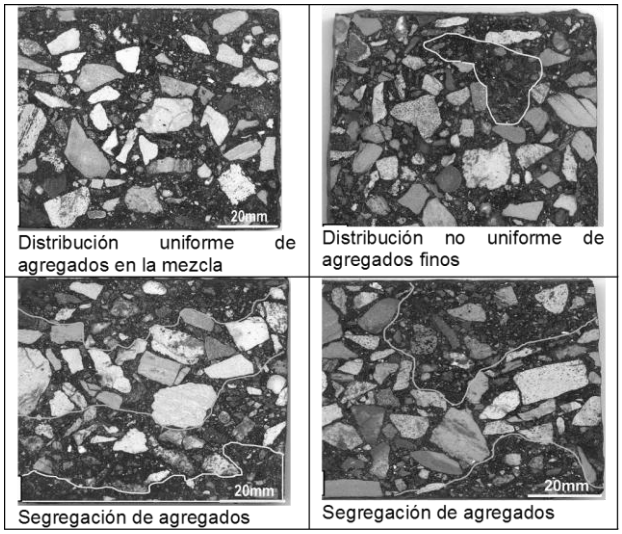



Figura 14. Distribución de agregados en la mezcla

En estos ejemplos se observan las diferentes situaciones halladas en los análisis, variando entre distribución uniforme de los agregados en la mezcla, hasta segregación ya sea por concentración de agregados finos o de los agregados de mayor tamaño hacia algunos sectores de los campos de observación.

4.5 Apariencia del mastic

Las partículas de agregado fino presentes en el mastic, no se pueden observar claramente en el microscopio petrográfico pero si se puede evaluar su textura, color y el grado de impregnación. El mastic se observa en tonalidades de marrón a café oscuro, identificando las texturas mostradas en la figura 15.

Se observaron tres apariencias básicas: en la primera, el material amorfo (asfalto) impregna al material más fino, generando que los bordes originales de las partículas queden bajo una cobertura de asfalto. En la segunda, se alcanza a identificar la presencia de cristales o fragmentos minerales pequeños (partículas tamaño limo y arcilla); en la tercera, se observa una textura moteada, caracterizada por presentar dominios de asfalto dispuestos al azar. También se identificaron casos en los que la ausencia de colores de interferencia en la masa fina de asfalto no permitió identificación alguna de los materiales finos del mastic.

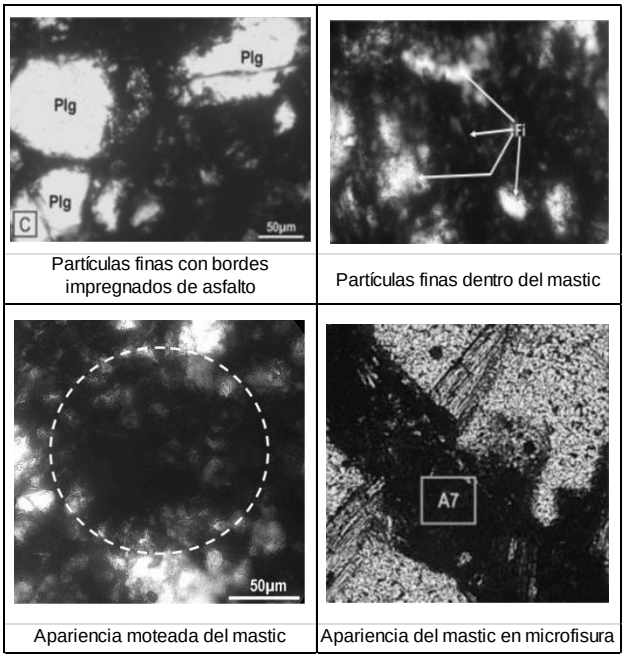



Figura 15. Apariencia del mastic

4.6 Otros Rasgos de Interés

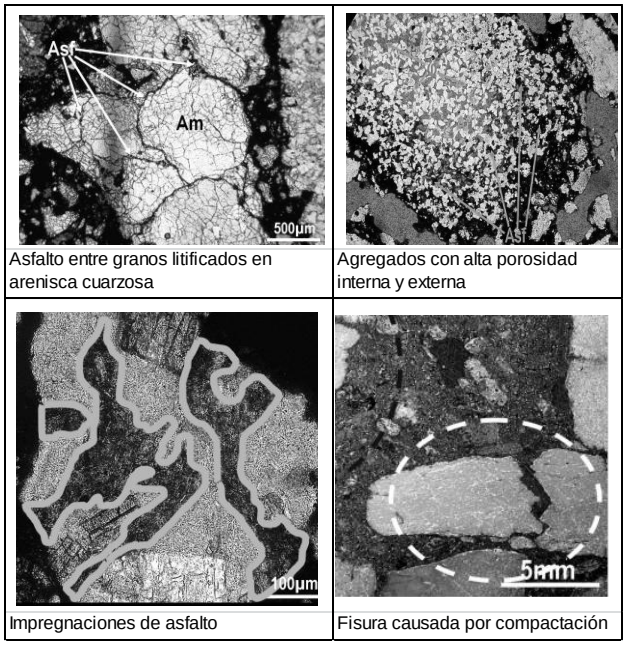
En la figura 16 se ilustran otros rasgos estructurales que resultan de interés, por su eventual incidencia en el comportamiento de las mezclas.

Se observó la presencia de asfalto bordeando los granos que forman el armazón de los agregados de origen sedimentario (fracción litificada), principalmente en areniscas cuarzosas de grano medio y fino. Esta particularidad se corroboró mediante el microanálisis de rayos X (EDX), realizado sobre una muestra de arenisca cuarzosa en la que el resultado muestra una concentración dentro del agregado de 37% en peso del elemento carbono, típico de compuestos orgánicos como el asfalto (derivado del petróleo).

Otra característica vista en areniscas cuarzosas con bastante porosidad interna es la existencia de asfalto rellenando varios poros, esto se presenta en algunos casos solo hacia los bordes del agregado y en otras ocasiones cubriendo la mayoría de la arenisca, sin distinguirse el borde original de ésta.

En algunas andesitas – basaltos, la mayoría con vidrio volcánico alterado en su matriz, se observa un recubrimiento con una película de asfalto formando sectores de manchas de color café rojizo. El uso de la microsonda de RX, verificó el contenido de carbono en las zonas de impregnación (37%).

Aunque no fue una situación común, sí se pudo identificar eventuales agrietamientos producidos por el proceso de compactación, caracterizado por presentar vacíos entre los fragmentos producto del rompimiento de agregados.




Asfalto entre granos litificados en arenisca cuarzosa | Agregados con alta porosidad interna y externa

Impregnaciones de asfalto | Fisura causada por compactación

Figura 16. Otros rasgos micro estructurales de interés

## 5 CONCLUSIONES

Las técnicas petrográficas y mineralógicas con microscopía óptica, electrónica y fluorescencia de rayos X, realizadas sobre secciones delgadas y bloques pulidos permiten observar y caracterizar de forma directa la estructura interna de las mezclas asfálticas.

Las cuatro fuentes de agregados utilizados para la elaboración de las mezclas de asfalto en el laboratorio están compuestos por granos de origen sedimentario, ígneo y metamórfico en menor proporción. El análisis de fluorescencia de RX es coherente con el análisis petrográfico y confirma la composición y origen de los cuatro tipos de agregados. En general los agregados presentan formas angulares a subangulares y microfisuras, principalmente en los de tamaños mayores y en los de origen ígneo.

En el análisis petrográfico de las mezclas asfálticas se identificaron varios tipos y configuraciones de microfisuras: finas, anchas e irregulares, con orientación radial, paralelas al borde o transversal; la mayoría de estas microgrietas se encuentran rellenas de asfalto. Estas fisuras pueden estar interconectadas y en cantidad suficiente para fragmentar el material, llegando a desintegrar completamente un grano (presente en los agregados de origen volcánico y en algunos cristales).

En algunos agregados de origen volcánico se observaron microgrietas orientadas por el contacto entre los cristales y la matriz, y en otras ocasiones, dirigiendo su rumbo a través de los cristales y siguiendo o no, los planos de exfoliación.

En cuanto a la proporción de microfisuras se observó una relación directa con los niveles de compactación.

Los agregados, dependiendo de su origen y sus características texturales, son afectados por el asfalto de varias formas: aquellos de origen sedimentario presentan asfalto en su armazón (asfalto intergranular), o rellenando pososidades y, aquellos de origen volcánico con alteración por impregnación evidenciada en manchas oscuras de asfalto. El uso de microscopía electrónica de barrido y microanálisis de RX, corroboró la presencia de asfalto en estos sectores.

Se observa en general buena interacción agregado-asfalto, aunque algunos agregados con bordes rectos exhiben vacíos alargados e irregulares alrededor de sus bordes, conectándose con el mastic a través de puentes de asfalto; otros con la misma característica exhibían una muy buena interacción con el asfalto.

Fue común ver casos de segregación de los constituyentes en la mezcla: en algunos casos con acumulación de agregados finos en zonas pequeñas, en otros, concentraciones de agregados gruesos ocupando áreas bastante grandes.

Los vacíos presentes en la mezcla exhiben diferentes formas y tamaños; en cuanto a su proporción no se observó una tendencia clara con el nivel de compactación o contenido de asfalto.

No se observaron claramente las partículas de agregado presentes en el mastic de las mezclas pero si se evaluó su textura, color y grado de impregnación.

Mediante la microsonda de rayos X se obtuvo la composición química del mastic el cual presenta además de alta concentración de carbono, otros elementos en menor proporción: Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Cl y Fe.

Aunque resulta muy confiable la práctica del conteo de constituyentes sobre bloques pulidos, en virtud de la mayor superficie de observación, los análisis a menor escala en secciones delgadas, contribuyeron a la observación de detalles difícilmente identificables en los bloques. Así las cosas, se recomienda el análisis macro sobre los bloques pulidos y el análisis micro, sobre las secciones delgadas, como métodos complementarios.

## AGRADECIMIENTOS

Se reconoce y aprecia el apoyo valioso de la DIB de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá y de los laboratorios de geotecnia y de geociencias de la misma Universidad. Igualmente se agradece el soporte proporcionado por las geólogas Constanza Ojeda, Nydia Romero y Nelly Páez, el ingeniero Geovanny Díaz y la empresa Concrescol S.A.

## REFERENCIAS

Agamalian, M et al., 2002. A new dynamical diffraction-based technique of residual stress measurements in thin films. Applied Physics A Materials Science & Processing. Appl. Phys. A 74 [Suppl.].

Barksdale, R. D., Pollard, C. O., Siegel, T., and Moeller, S. 1992. “Evaluation of Effects of Aggregates on Rutting and Fatigue of Asphalt”. Technical Report FHWA-GA-92-8812, Georgia Department of Transportation, Atlanta, Georgia.

Chandan C. et al., 2003. Geometry analysis of aggregate particles using imaging techniques. National Cooperative Highway Research, IDEA program, and the Federal Highway Administration.

Fletcher, T., Chandan, C., Masad, E., Sivakumar, K. 2002-I. Measurement of Aggregate Texture and Its Influence on HMA Permanent Deformation. Journal of Testing and Evaluation, American Society for Testing and Materials, ASTM, ( 30), No. 6: 524-531.

Fletcher, T., Chandan, C., Masad, E., Sivakumar, K. 2002-II. Aggregate imaging system (AIMS) for characterizing the shape of fine and coarse aggregates. A Paper Submitted to the 82nd Annual Transportation Research Board.

Gordon D. Airey, Alistair E. Hunter and Andrew C. 2004. Effect of Asphalt Mixture Compaction on Aggregate Orientation, Segregation and Mechanical Performance. 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. Nottingham Centre for Pavement Engineering. CAPSA'04.

Ishai, I., Gelber, H. 1982. Effect of Geometric Irregularity of Aggregates on the Properties and Behavior of Asphalt Concrete. Association of Asphalt Paving Technologists, ( 51).

Janoo, V. C. 1998. Quantification of Shape. Angularity and Surface Texture of Base Course Materials. Special Report 98-1. Cold Regions Research & Engineering Laboratory. U.S. Army Corps of Engineers.

Janoo, Vincent C, Bayer John J. II. 2001. The Effect of Aggregate Angularity on Base Course Performance. US Army Corps Engineers.

Kandhal, P.S., F. Parker, Jr. (1998). Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements. In National Cooperative Highway Research Program Report 405, TRB, National Research Council, Washington, D.C.

Ketcham Richard A., 2003. Optimization and Measurement of High-Resolution X-ray CT Imagery for Asphalt Concretes. Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin, Austin.

Kim, H., Haas, C.T., Rauch, A.F., Browne, C., 2002. Wavelet-based Three Dimensional Descriptors of Aggregate Particles. In Transportation Research Record: 109-116.

Lytton, R., 2000. Characterizing Asphalt Pavements for Performance. Transportation Research Record 1723, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.: 5-16.

Masad, E.; Muhunthan, B.; Shashidhar, N.; Harman, T., 1998. Aggregate Orientation and Segregation in Asphalt Concrete. Geotechnical Special Publication, ASCE, GSP 85: 69-80.

Masad, E.; Muhunthan, B.; Shashidhar, N.; Harman T., 1999-I, Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis. ASCE Journal of Computing in Civil Engineering (Special Issue on Image Processing), 13(2): 88-95.

Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N., Harman T., 1999-II. Effect of Compaction Procedure on the Aggregate Structure in Asphalt Concrete. Transportation Research Record 1681, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.: 179-185.

Masad, E., Button, J., Papagiannakis, T., 2000. Fine Aggregate Angularity: Automated Image Analysis Approach, In Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board 1721: 66 – 72.

Masad, E., 2003. The Development of A Computer Controlled Image Analysis System for Measuring Aggregate Shape Properties. NCHRP-IDEA Project 77 Final Report, Transportation Research Board, Washington, DC.

Masad, E., Olcott, D., White, T., and Tashman, L., 2001. Correlation of Fine Aggregate Imaging Shape Indices with Asphalt Mixture Performance. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board 1757: 148 - 156.

Monismith, C. L. 1991. Analytically based asphalt pavement design and rehabilitation. Transportation Research Board, 1354. National Research Council. Washington D.C.

Poblete, V., Pilleux, M. 2001. Microscopia electrónica de barrido. Seminario ID42A ciencia de los materiales II. Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas IDIEM.

Rao, C., Tutumluer, E., 2000. A New Image Analysis Approach for the Determination of Volume of Aggregates. Transportation Research Record 1721, Washington DC: 73-80.

Rao, C., Tutumluer, E., Stefanski, J.A., 2001. Flat and Elongated Ratios and Gradation of Coarse Aggregates Using a New Image Analyzer. In ASTM Journal of Testing and Standard, (29), No. 5: 79-89.

Rao, C., Tutumluer, E., Kim, I., 2002. Quantification of Coarse Aggregate Angularity based on Image Analysis. In Transportation Research Record 1787, Washington DC: 117-124.

Tashman, L., Masad, E., Peterson, B., Saleh, H. 2001. Internal Structure Analysis of Asphalt Mixes to Improve the Simulation of Superpave Gyratory Compaction to Field Conditions. Association of Asphalt Paving Technologists, (70):. 605-655.

Tutumluer, E., Rao, C., Stefanski, J., 2000. Video Image Analysis of Aggregates. Final Project Report, FHWA-IL-UI-278, Civil Engineering Studies UILU-ENG-2000-2015, University of Illinois Urbana-Champaign, Urbana, IL, Julio 2000.

Wang, L.B., Lai, J.S. 1997. Fourier Morphological Descriptors of Aggregate Profiles. In Proceedings of the 2nd International Conference on Imaging Technologies: 76-87.

Yue, Z. Q., Bekking W., Morn I. 1995. Application of digital image processing to quantitative study of asphalt concrete microstructure. Transportation Research Board, 1492. National Research Council. Washington D.C.