

Medición de la resistencia a flexión de mezclas de concreto asfáltico a partir del análisis de la magnitud de deformaciones ocurridas en especímenes sometidos a cargas puntuales

Measurement of the flexural strength of mixtures of asphaltic concrete from the analysis of the magnitude of deformations occurred in specimens subjected to point loads

Luis Alejandro Buitrago Palacios¹

alejandrobuitragopalacios@gmail.com

Nelson Andrés Salgado Orjuela¹

nelsonandres.salgado@gmail.com

Stiven Serrano Romero¹

stivserro@gmail.com

¹Semillero de Investigación en Geotecnología. Línea de investigación del programa de Geomateriales. Línea de investigación del grupo HD+i: Infraestructura y Nuevas Tecnologías. Universidad Piloto de Colombia. Director Proyecto: Juan Carlos Ruge C., Codirector Proyecto: Hugo Alexander Rondón

RESUMEN: Generalmente las mezclas asfálticas colocadas in-situ sobre la estructura de un pavimento, comienzan a fisurarse de manera prematura por la propagación de discontinuidades provenientes de capas inferiores. Sin embargo, la resistencia residual del material sigue manteniendo un nivel importante de esfuerzos por movilizar, a pesar de la aparición de estas fisuras tempranas. Para que exista una falla a fatiga por flexión debe existir una sollicitación repetitiva de cargas dinámicas, provocada por los vehículos que transitan continuamente. Las metodologías analíticas actuales para calcular la falla a fatiga por flexión de una mezcla asfáltica no reproducen de manera acertada el umbral del nivel de esfuerzo en la falla, ni el nivel de deformación correspondiente a dicho esfuerzo. En esta investigación se diseñó un ensayo de laboratorio para ocasionar la falla en una mezcla asfáltica tipo MDC-19 y MDC-25, modificando diferentes parámetros físicos en los especímenes ensayados, mediante una carga monotónica puntual, pretendiendo entender a priori el efecto de este tipo de cargas más simples sobre el material bajo análisis, para luego en una fase posterior aplicar cargas repetitivas que provoquen la falla por fatiga en la mezcla asfáltica. Los resultados obtenidos permitieron

conocer los niveles de esfuerzo a la falla requeridos para ocasionar un cierto valor de deformación a flexión.

Palabras Clave: mezclas asfálticas, falla a flexión, mezclas densas en caliente, concreto asfáltico.

ABSTRACT. Generally, asphalt mixtures placed in-situ on the structure of a pavement, begin to crack prematurely by the propagation of discontinuities from lower layers. However, the residual strength of the material continues to maintain a significant level of stress to be mobilized, despite the appearance of these early cracks. For there to be a fatigue failure due to flexion there must be a repetitive demand for dynamic loads, caused by vehicles that continuously transit. The current analytical methodologies for estimating the flexural fatigue failure of an asphalt mixture do not accurately reproduce the stress level threshold at the fault or the strain level corresponding to that stress. In this research, a laboratory test was designed to cause failure in an MDC-19 and MDC-25 asphalt mixture, modifying different physical parameters in the specimens tested, by means of a monotonic punctual load, trying to understand a priori the effect of this type of simpler loads on the material under analysis, then in a later

phase apply repeated loads that provoke fatigue failure in the asphalt mixture. The obtained results allowed to know the levels of failure stress required to cause a certain value of deformation to flexion.

Keywords: asphalt mixtures, flexural failure, hot dense mixtures, asphaltic concrete.

1 INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas durante su vida útil están sometidas a una serie de factores externos y fenómenos intrínsecos que controlan su desempeño, haciendo que su estudio sea muy complejo mediante metodologías analíticas que reproduzcan todos los aspectos que inciden en su comportamiento. Entre ellos se encuentra la fisuración por fatiga. Normalmente la fatiga en el laboratorio se mide mediante vigas sometidas a flexión, articulando directamente el esfuerzo o deformación ocurrido en el material con el número de sollicitaciones reiteradas hasta la falla de la mezcla bituminosa, a este se le conoce como el análisis tradicional de fatiga mediante las curvas de Wöhler (Zheng et al, 2017; Pell, 1962; Pronk & Hopman, 1990; Tayebali et al, 1996; Van Dijk & Visser, 1977).

Específicamente para esta investigación se requiere entender primero la respuesta flexural de la mezcla asfáltica ante cargas monotónicas, antes de entrar a simulaciones físicas más complejas, usando cargas repetitivas sobre los especímenes. En virtud de lo anterior, fue diseñado un ensayo variando una serie de parámetros, tanto en la elaboración y especificaciones de las muestras, como en la forma de llevar el material hasta la falla. En resumen, se enfatizó principalmente en relacionar el nivel de carga obtenido con la deformación que sobreviene con la fisuración a la falla, y de acuerdo con estos resultados comparar los datos medidos con las metodologías analíticas existentes.

2 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

El comportamiento mecánico de mezclas asfálticas puede evaluarse de diversas maneras, de acuerdo con la trayectoria de esfuerzos experimentada por el material. Dictaminada entre otros factores, por la manera como es aplicada la carga en el espécimen seleccionado.

La mayoría de los ensayos enfatizan los resultados en la respuesta a la fatiga del material, sin embargo, aunque este no es el alcance directo de esta investigación, se analizarán en este aparte los antecedentes más importantes de la temática abordada, entendiendo que el objetivo inicial es evaluar la resistencia mecánica de una mezcla asfáltica mediante una carga monotónica puntual.

La fisuración en pavimentos de concreto asfáltico acaece de forma progresiva, causando daños estructurales y funcionales, llevando el material a fallas incipientes. Estas fallas generalmente están controladas por la fatiga del material y fisuras de tipo térmico por baja temperatura, factores que se consideran los más críticos en procesos de diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos flexibles (Saha & Prapoornas, 2016).

En síntesis, el estudio de la evolución de fisuración incluye diferentes variables complejas de reproducir en un laboratorio, como la heterogeneidad de la interface ligante entre asfalto y agregado, efectos

de envejecimiento y el comportamiento viscoelástico no lineal en mezclas asfálticas (Elices et al, 1992; Kliewer et al, 1996; Roque et al, 2002; Montepara et al, 2004; Li & Marasteanu, 2005; Hu et al, 2009; Moreno & Rubio, 2013; Moon et al, 2014; Meena et al, 2016; Saha & Prapoornas, 2016).

Se considera que alrededor de la década de los 40 en el mundo inició el aumento exponencial de vehículos, así como la carga transferida a través de sus neumáticos (Li, 2013). Desde prácticamente esa fecha se ha reportado que los pavimentos flexibles comienzan a fallar a deformaciones (deflexiones) muy pequeñas, cercanas a los 0,5 mm (Porter, 1942). La resistencia a flexión en estos materiales es normalmente excedida por la acción continua del tráfico, este efecto es revelado con la aparición de fisuras al final de la vida útil (Nijboer, 1953).

En términos de solicitaciones dinámicas, Hveem (1955) fue de los primeros en publicar fallas producidas por fatiga del material en pavimentos sobre estructuras de alto módulo resiliente.

Sin embargo, no solo en la falla por fatiga ocurren procesos mecánicos, es claro que están involucrados aspectos químicos, mineralógicos y físicos. Los procesos mencionados están relacionados con varias fases de deterioro progresivas que ocurren a menudo en el siguiente orden: aparición y propagación de microfisuras, formación de macrofisuras a partir de microfisuras, propagación de macrofisuras y desintegración o falla. El uso de ensayos mecánicos no empíricos para analizar la respuesta a fatiga de mezclas asfálticas es sumamente crucial para la predicción de escenarios del desempeño en servicio de estos materiales.

Actualmente existen varias tipologías de ensayos para reproducir la fatiga en mezclas asfálticas, usadas en proyectos de infraestructura vial. En esta clase de ensayos cobra importancia la manera como se aplica la carga. De acuerdo con lo anterior, normalmente se considera que existen tres grandes clasificaciones donde se agrupan los ensayos: flexión simple, carga uniaxial directa y carga diametral (Tangella et al., 1990). También es importante realizar una diferenciación en lo concerniente a la distribución de

esfuerzos y deformaciones en la muestra. De acuerdo con esto, es posible distinguir entre ensayos de tipo homogéneo (distribución uniforme a lo largo de la muestra) y heterogéneo (distribución no uniforme a lo largo de la muestra).

2.1 ENSAYOS DE FLEXIÓN SIMPLE

Generalmente son asociados a los puntos de flexión a los que está sometida la probeta, y a las dimensiones y geometría de la misma.

2.1.1 ENSAYO DE DOS PUNTOS DE FLEXIÓN

Los primeros esbozos de este tipo de ensayos fueron desarrollados por Verstraeten (1972), van Dijk (1975) y Bonnot (1986), usando muestras trapezoidales, donde la dimensión menor de la probeta es sometida a un desplazamiento sinusoidal. La selección apropiada de las dimensiones del espécimen se define fallando la muestra cerca de la mitad de la altura de la probeta, donde el esfuerzo de flexión es mayor (Fig.1 – Tabla 1).

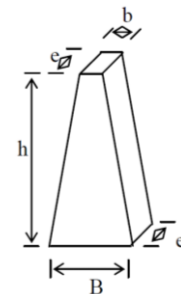


Figura 1. Geometría de la muestra (Li, 2013)

Tabla 1. Dimensiones de la probeta para ensayos de dos puntos de flexión (Li, 2013)

| | Tipo de mezcla | | |
|---|----------------|------------|----------------|
| | D<14mm | 14<D<20 mm | 20 < D < 40 mm |
| B | 56 | 70 | 70 |
| b | 25 | 25 | 25 |
| e | 25 | 25 | 50 |
| h | 250 | 250 | 250 |

D: tamaño máximo de agregado en la mezcla asfáltica

2.1.2 ENSAYO DE TRES PUNTOS DE FLEXIÓN

Al igual que en los ensayos de dos puntos, uno de los precursores en la temática, van Dijk (1972) utilizó un equipo de carga puntual centralizada, donde fue controlada la deflexión en la muestra. Un desplazamiento cíclico sinusoidal será

aplicado en el centro de la muestra. La frecuencia será de 10Hz, así como los valores de amplitud se encuentran normalmente entre 80 y 350 μm dependiendo de la mezcla asfáltica utilizada (Figura 2).

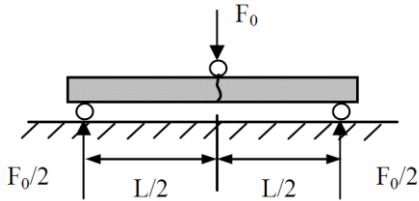


Figura 2. Esquema ensayo de flexión de tres puntos (Li, 2013)

2.1.3 ENSAYO DE CUATRO PUNTOS DE FLEXIÓN

Según Molenaar (1987), las probetas para esta clase de ensayos son obtenidas directamente in-situ, mediante pequeñas losas de 0.6 x 0.6 m² que son tomadas del pavimento asfáltico en servicio. A partir de estas losas son obtenidas unas mini-vigas de 450 mm x 50 mm x 50 mm, con la longitud perpendicular a la dirección del tráfico.

El estándar ASTM D7460 (ASTM, 1996) recomienda dimensiones del espécimen de 380 (longitud) x 50 (altura) x 63 (espesor) mm. Previamente se debe seleccionar la deformación deseada (250 a 750 microstrain) y la frecuencia entre 5 y 10 Hz. La rigidez inicial es definida en el quincuagésimo ciclo de carga, el cual queda fijado como referencia para identificar la falla del espécimen. Un nivel de deflexión es escogido a la cual permita a la probeta experimentar al menos 10000 ciclos de carga antes que la rigidez se reduzca en un 50% o menos de la rigidez inicial.

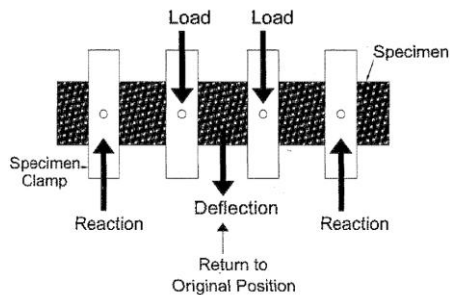


Figura 3. Características de la carga del ensayo de cuatro puntos de flexión (ASTM, 1996)

2.2 ENSAYOS DE CARGA UNIAXIAL DIRECTA

Para el desarrollo de este ensayo (Raithby, 1972) diseñó una probeta prismática de sección transversal de 75 mm² y longitud de 225 mm. Protectores de aluminio son colocadas en los extremos de las muestras, para ser montadas en una máquina MTS hidráulica servocontrolada. Normalmente las frecuencias de las cargas oscilan entre 16.7 y 25 Hz.

También Molenaar (1983), usó el ensayo de carga directa para estudiar el crecimiento de fisuras. En las muestras utilizadas a una distancia cerca de la mitad de su altura, una fisura artificial es inducida en las dos caras opuestas, la cual tiene una profundidad de 0.005 m. de igual manera que en algunos ensayos de flexión los especímenes en formas de viga son tomados de unas losas mayores (Figura 4).

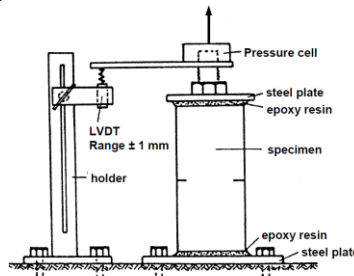


Figura 4. Esquema de un ensayo directo de tensión (Molenaar, 1983).

2.3 ENSAYOS DE CARGA DIAMETRAL

Ensayo realizado sobre muestras cilíndricas, donde es aplicada una carga de compresión diametral que induce un esfuerzo perpendicular a tensión, este ensayo es conocido también como de tracción indirecta (Li, 2013), en la Figura 5 se puede observar el esquema teórico que explica el ensayo.

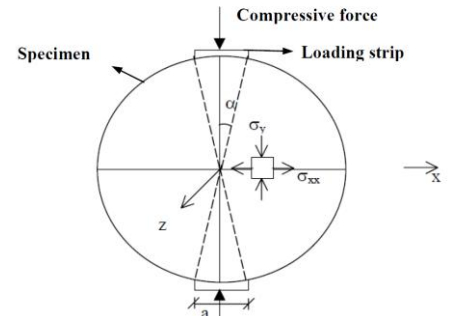


Figura 5. Ensayo de tracción indirecta (Li, 2013).

3 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio actual presentado en este artículo es el primer punto de análisis para una investigación a largo plazo, que busca analizar la falla por fatiga en vigas de mezclas asfálticas sometidas a cargas repetitivas. Lo anterior, con el fin de extrapolar los resultados a la mejora y el entendimiento del comportamiento de estos materiales durante su vida útil de trabajo.

El objetivo puntual es medir la resistencia de mezclas de concreto asfáltico, con el fin de correlacionar la respuesta que experimentan las mezclas con resultados de ensayos de fatiga. Para lograr este objetivo se siguieron una serie de pasos esenciales para cumplir el cometido trazado: caracterizar los materiales que hacen parte de la mezcla asfáltica mediante la normatividad que rige actualmente ese tipo de ensayos (INVIAS, 2013), elaborar las muestras teniendo en cuenta las modificaciones de los contenidos de materiales bituminosos y pétreos seleccionados para la investigación y ejecutar los ensayos de carga puntual a las probetas escogidas sometiéndolas a flexión bajo carga monótonica. Finalmente se propone una correlación para la obtención de esfuerzos y resistencia a flexión en vigas a partir de las deformaciones, entre las metodologías de análisis clásicas y las obtenidas de los ensayos.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio en particular, se diseñó un ensayo que evalúa la flexión en mezclas asfálticas bajo carga monótonica. En ese sentido se realizaron

diferentes variaciones en los materiales involucrados en la investigación.

4.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

En la Tabla 1 se muestra la caracterización del agregado pétreo usado en la elaboración de las mezclas asfálticas, el cual es denominado como agregado natural (AGN).

Tabla 1. Caracterización del AGN

| Ensayo | Método | AGN |
|---|-----------------|-------------|
| Gravedad Específica / Absorción (¾") | | 2.51/1.66% |
| Gravedad Específica / Absorción (3/8") | | 2.49/1.70% |
| Gravedad Específica / Absorción (No. 4) | AASHTO T 84-00 | - |
| Gravedad Específica / Absorción (No. 40) | AASHTO T 85-91 | - |
| Gravedad Específica / Absorción (No. 80) | | - |
| Gravedad Específica / Absorción (No. 200) | | - |
| Gravedad Específica de arenas y finos / Absorción | | 2.50/1.50% |
| Abrasión en Máquina de Los Ángeles, 500 revs. | AASHTO T 96-02 | 24.6% |
| Micro-Deval | AASHTO T327-05 | 22.3% |
| 10% de finos (resistencia seca) | DNER-ME 096-98 | 115 kN |
| Partículas fracturadas: 1 cara | ASTM D 5821-01 | 87% |
| Partículas fracturadas: 2 caras | | 80% |
| Contenido de impurezas | UNE 4613: 2000 | 0% |
| Índice de Plasticidad | ASTM D 4318-00 | No plástico |
| Índice de aplanamiento | NLT 354-91 | 9.5% |
| Índice de elongación | | 9.5% |
| Equivalente de arena | AASHTO T 176-02 | 76% |

El agregado pétreo (AGN) presenta que por lo menos para los tamices señalados en la Tabla 1, que a medida que la gravedad específica del material disminuye, la absorción aumenta levemente. Esto se debe a que entre más partículas pequeñas existan, se incrementa también la superficie específica del material, lo que se traduce en un mayor porcentaje de caras disponibles, para un fluido potencialmente absorbido. En relación con los resultados del ensayo Micro-Deval y 10% de finos, es posible inferir que el AGN muestra una aceptable resistencia a la abrasión entre partículas, así como poco quebramiento de las mismas ante una carga monotónica.

También se observa que el material analizado muestra partículas idóneas para la mezcla requerida (caras angulares y redondeadas con poco contenido de

partículas alargadas y aplanadas). Estas características físicas son importantes a la hora que la mezcla asfáltica sea sometida a un proceso de compactación ya que existiría una estructura granular resistente a cargas estáticas o dinámicas. No se evidencia contenido de mineral arcilloso u orgánico, que afecte la adherencia entre agregados y el bitumen.

Los ensayos de caracterización para el material bituminoso Cemento Asfáltico CA 60-70, se encuentran establecidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización del CA 60-70

| Ensayo | Método | Unidad | Valor |
|--|-----------------|--------|-------|
| CA original | | | |
| Penetración (25°C-100 g-5 s) | ASTM D-5 | 0.1 mm | 62.5 |
| Índice de penetración | NLT 181/88 | - | -0.7 |
| Punto de ablandamiento | ASTM D-36-95 | ° C | 52.5 |
| Viscosidad absoluta (60°C) | ASTM D-4402 | Poises | 1750 |
| Gravedad específica | AASHTO T 228-04 | - | 1.012 |
| Viscosidad a 135° C | AASHTO T-316 | Pa-s | 0.36 |
| Ductilidad (25°C, 5cm/min) | ASTM D-113 | cm | >105 |
| Ensayos sobre el residuo de CA después del RTFOT | | | |
| Pérdida de masa | ASTM D-2872 | % | 0.47 |
| Penetración (25°C-100 g-5s) % de la penetración original | ASTM D-5 | % | 72 |
| Incremento del punto de ablandamiento | ASTM D-36-95 | ° C | 5 |

4.1.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA MINERALÓGICA Y MICROESTRUCTURAL DEL AGN

Hoy día es vital conocer las propiedades de los materiales, a todo nivel y no solo limitarse a las caracterizaciones convencionales. Por esta razón, esta investigación comprende una caracterización de variables que pueden brindar herramientas para explicar comportamientos difíciles de entender con estudios tradicionales. Por tal razón se realizaron unos ensayos de Difractometría de Rayos X (DRX), Fluorescencia de Rayos X (FRX) y análisis de imagenología para estudiar la microestructura del material usando el microscopio electrónico de barrido (SEM).

4.1.1.1 DRX

La composición mineralógica primordial de una muestra de materia pétreo puede ser determinada también mediante difracción de rayos X. La preparación es realizada mediante un montaje en polvo, garantizando que los RX incidan de manera equitativa en cualquier plano cristalino de los minerales, al estar los cristales de estos orientados aleatoriamente. Sin embargo, minerales con una respuesta cristalino-laminar (con contenidos de minerales arcillosos) tienden a orientarse preferentemente, fenómeno tenido en cuenta a la hora de la interpretación.

De igual manera se realizó un montaje mediante la técnica de agregados orientados que permite que las partículas con diámetro entre 0.98 y 3.9-µm se orienten, consiguiendo una difracción de RX a lo largo de un eje longitudinal de los minerales. Esta respuesta es sumamente importante porque brinda información acerca de la distancia entre las láminas que conforman los minerales de la arcilla.

La Tabla 3 muestra el porcentaje de cada fase mineral identificada en el montaje en polvo de la muestra. Los resultados poseen una incertidumbre asociada de +/- 2%.

Tabla 3. Porcentaje en peso (% Peso) de cada fase mineral identificada en la muestra.

| Mineral | Formula Química | (% Peso) |
|---------|--|----------|
| Cuarzo | SiO ₂ | 61.00 |
| Albita | NaAlSi ₃ O ₈ | 25.05 |
| Illita | (K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ | 5.28 |
| Clorita | (Mg,Fe) ₂ Al(Si ₂ Al)O ₁₀ (OH) ₂ | 8.67 |

Es esencial para el análisis realizar un estudio detallado de los minerales arcillosos. No obstante, en los patrones de difracción orientados pueden revelarse de la misma forma, minerales que no pertenecen al grupo de silicatos de aluminio característico de las arcillas. Por lo tanto, en la Tabla 4 se reconocen las fases cristalinas en el difractograma de agregados orientados, presentando un recálculo al 100% del porcentaje en peso exclusivo para los minerales arcillosos.

Tabla 4. Fases cristalinas de la Tabla 1 reconocidas en el difractograma de agregados orientados

| Mineral | % peso recalculado |
|---------|--------------------|
| Illita | 37.85 |
| Clorita | 62.15 |

4.1.1.2 FRX

La preparación de las muestras para análisis por fluorescencia de RX consiste en trituración (si el tamaño de partícula de la muestra es mayor a 75 micras), calcinación y perlado. La trituración se realiza con el fin de obtener una muestra homogénea que evite la formación de aglomerados de cristales al realizar la perla.

El proceso de calcinación consiste en llevar la muestra a 1000°C, y mantenerla a esa temperatura durante 1 hora, para evaluar el % en peso perdido durante el tratamiento al pesar la muestra antes y después, a 105°C. Estas pérdidas por calcinación (L.O.I. por sus siglas en inglés Loss On Ignition) representan la cantidad de componentes volátiles (H₂O, CO₂, F, Cl y S), así como materia orgánica, no detectados con el equipo de fluorescencia.

El análisis elemental calculado en forma de compuestos (para elementos mayores) y de los elementos más importantes, se muestra a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Concentración de cada óxido identificado en las muestras recalculado con el valor de LOI

| Elemento y/o compuesto químico | % en peso de la muestra |
|--------------------------------|-------------------------|
| SiO ₂ | 79,00 |
| Al ₂ O ₃ | 7,86 |
| Fe ₂ O ₃ | 3,70 |
| MgO | 2,34 |
| Na ₂ O | 1,82 |
| K ₂ O | 1,17 |
| CaO | 1,09 |
| TiO ₂ | 0,44 |
| P ₂ O ₅ | 0,11 |
| L.O.I. | 2,10 |

4.1.1.3 MICROESTRUCTURA Y POROSIDAD

La microestructura de cualquier material que es componente de un sistema que funciona mecánicamente, gobierna parte de su comportamiento, en especial si la microestructura es susceptible de ser invadida por un fluido que condiciona su respuesta mecánico-hidráulica.

La preparación de las muestras de material pétreo para una prueba de imagenología, se seleccionaron para obtener un resultado estadísticamente

confiable. Con los fragmentos seleccionados se realizó un montaje rectangular de 4.7 cm x 2.5 cm con resina transparente. El montaje se recubrió con grafito, para crear una película conductora y poder analizarlo en el microscopio electrónico de barrido (SEM), en modo de alto vacío.

Las micrografías fueron tomadas con un detector de electrones retro dispersados (BSE) y los espectros de energía dispersiva de rayos x (EDX), para el análisis elemental se obtuvieron con un tiempo de detección de rayos x de 60 segundos. Las muestras del material pétreo se seleccionaron para obtener un resultado estadísticamente confiable. Los granos escogidos fueron siete, los cuales presentaban características litológicas diferentes. No poseen características compartidas y se clasificaron de acuerdo con tamaño de grano, color y esfericidad.

A continuación, la muestra es cortada y pegada en un vidrio petrográfico. La muestra se desbasta, hasta llegar a un espesor de 30µm y de esa manera se obtiene la sección delgada. Paso siguiente consistió en pulir a espejo (abrasivos en discos y paños) la superficie de interés, para luego depositar una capa conductora en su superficie. En la Figura 1 se puede ver el resultado final previa metalización.



Figura 1. Muestra ensamblada con granos seleccionados

La muestra fue sometida a imagenología mediante el microscopio electrónico de barrido (MEB) y varias fotografías fueron tomadas de cada grano individual a diferentes aumentos. En este caso se preparó una sección delgado-pulida para poder encontrar diferencias composicionales entre los granos. Es importante determinar el tipo de litología para determinar si se pueden separar por grupos composicionales.

Los granos fueron escogidos según su color y tamaño de grano. Después de la observación por medio del microscopio petrográfico, no se pudo determinar un grupo litológico específico. La diferenciación entre las coloraciones escogidas desde el principio indicó

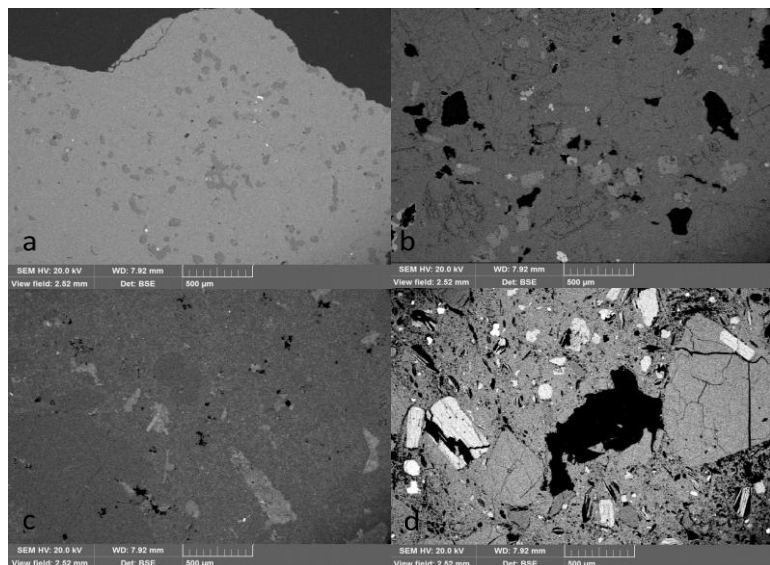


Figura 2. Imágenes representativas de los granos G1(a), G2 (b), G3 (c) y G4 (d).

efectivamente composiciones diferentes a las cuales se les calculó la porosidad. Se tomaron varias imágenes de cada grano a un aumento de 30x para obtener unos resultados estadísticamente confiables. Los resultados se encuentran en la Tabla 6.

porcentajes de porosidad menores a 1%, se encuentran los granos 1, 3 y 7, los cuales son de composiciones variables siendo el fragmento 1 y 3 fragmento ígneos compuesto de piroxenos, micas, cuarzos, plagioclasas y biotitas que en el caso del fragmento 3 exhiben procesos de sausrización.

los granos tipo 2, 4 y 5 son los que tienen mayor porcentaje de porosidad efectiva.

Adicionalmente se puede observar que a pesar de que los granos de tipo 7 tienen la porosidad más baja, presentan microfracturas, las cuales ayudan a la interconexión entre los granos y, por consiguiente, estos no son los que presentan un menor promedio en tamaño de garganta poral. Lo contrario ocurre en el caso de los granos tipo 3, estos revelan menos espacio poroso sin embargo debido a microfracturas en localizaciones puntuales, el tamaño de las gargantas aumenta, estos datos explican datos importantes de la muestra, pero no se pueden extrapolar a toda la muestra.

Por último, los granos tipo 1 y 6 tienen baja porosidad y algunas microfracturas las cuales no aumentan la interconexión de los vacíos, puesto que estos son muy aislados. Presentan una porosidad aislada no efectiva.

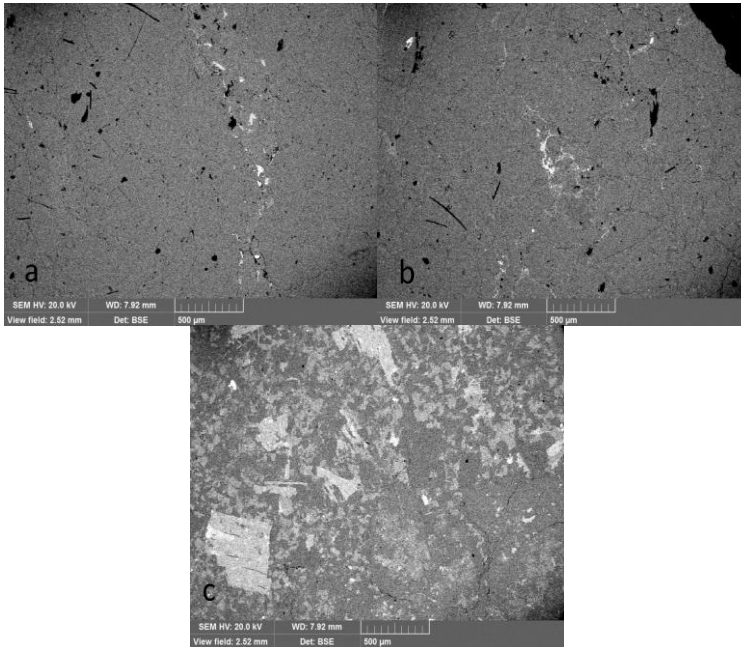


Figura 3. Imágenes representativas de los granos G5(a), G6 (b) y G7 (c).

Tabla 6. Valores de las porosidades calculadas para cada uno de los granos seleccionados

| Granos | Porosidad % |
|--------|-------------|
| G1 | 0,6 |
| G2 | 20,832 |
| G3 | 13,904 |
| G4 | 6,520 |
| G5 | 2,261 |
| G6 | 0,979 |
| G7 | 0,862 |

Los granos que presentan mayor porosidad son los identificados con los números 2 y 4 que corresponden a fragmentos ígneos compuestos principalmente de anfíboles y plagioclasas, el fragmento 4 presenta también un alto contenido de biotita.

Si siguiendo en porcentaje de porosidad se encuentran los granos 5 y 6 que presentan similar porosidad y una composición caracterizada por cuarzo como material del esqueleto y arcillas como material intersticial, el fragmento 5 muestra lineaciones que sugieren procesos de deformación. El último grupo, conformado por fragmentos con

Los fragmentos 7 por su parte están compuestos por material calcáreo con fósiles, calcita recristalizada y matriz micrítica. Las Figuras 2 y 3 hacen referencia a las imágenes tomadas por medio del MEB donde se puede ver una muestra de los diferentes tipos de granos. Se pueden observar sus características y diferencias, evidenciando la porosidad de cada uno con los intersticios en tonalidad oscura. En cuanto a los resultados de garganta porales encontramos una concordancia en la gran mayoría que muestra una relación positiva entre los espacios vacíos y la interconexión de estos. Los granos del tipo 4 presentan mayor porosidad e interconexión de estos, teniendo un promedio de tamaño de garganta superior a los demás.

Estas interconexiones se encuentran ayudadas de microfracturas que se distribuyen a lo largo del grano. Este fenómeno también ocurre (en menor proporción) con los granos tipo 2 y 5. De acuerdo con esto se puede concluir que

Tabla 7. Datos estadísticos de las gargantas porales cada una de las poblaciones de granos

| Resumen estadístico granos G1 | |
|-------------------------------|-------|
| Promedio (µm) | 6,0 |
| Desviación (µm) | 5,6 |
| Mediana (µm) | 2,0 |
| Máximo (µm) | 17,2 |
| Mínimo (µm) | 0,7 |
| Resumen estadístico granos G2 | |
| Promedio (µm) | 27,1 |
| Desviación (µm) | 10,7 |
| Mediana (µm) | 23,7 |
| Máximo (µm) | 54,2 |
| Mínimo (µm) | 8,5 |
| Resumen estadístico granos G3 | |
| Promedio (µm) | 10,4 |
| Desviación (µm) | 5,0 |
| Mediana (µm) | 10,7 |
| Máximo (µm) | 17,0 |
| Mínimo (µm) | 2,1 |
| Resumen estadístico granos G4 | |
| Promedio (µm) | 36,4 |
| Desviación (µm) | 30,5 |
| Mediana (µm) | 18,2 |
| Máximo (µm) | 262,7 |
| Mínimo (µm) | 2,7 |
| Resumen estadístico granos G5 | |
| Promedio (µm) | 11,0 |
| Desviación (µm) | 6,7 |
| Mediana (µm) | 8,1 |
| Máximo (µm) | 25,4 |
| Mínimo (µm) | 2,6 |
| Resumen estadístico granos G6 | |
| Promedio (µm) | 7,9 |
| Desviación (µm) | 5,2 |
| Mediana (µm) | 4,9 |
| Máximo (µm) | 21,7 |
| Mínimo (µm) | 2,2 |
| Resumen estadístico granos G7 | |
| Promedio (µm) | 7,8 |

| | |
|-----------------|------|
| Desviación (µm) | 3,8 |
| Mediana (µm) | 7,3 |
| Máximo (µm) | 21,7 |
| Mínimo (µm) | 2,2 |

4.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN BAJO CARGA MONOTÓNICA

Para obtener el contenido óptimo de asfalto fueron compactadas cinco muestras Marshall sometiéndolas a 75 golpes por cara, variando los porcentajes de asfalto de 4,5% a 6,0%, en escalones de 0,5%. La granulometría escogida se encuentra presentada en la Figura 4.

Las temperaturas para la etapa de compactación y mezclado fueron de 140°C y 150°C, respectivamente. Los valores anteriores adoptados según la metodología basada en ASTM D6925 que recomienda temperaturas de mezclado y compactación de mezclas densas en caliente de 85±15 SSF (170 cP) y 140±15 SSF (280 cP).

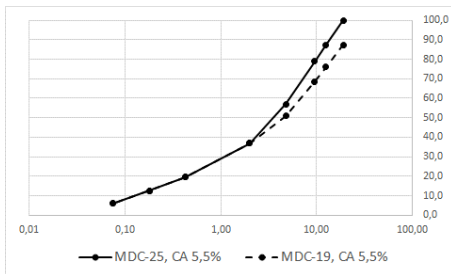


Figura 4. Granulometría de las mezclas asfálticas



Figura 5. Ejemplo de probetas de mezclas asfálticas

Los resultados del ensayo Marshall para determinar los contenidos óptimos de asfalto de las mezclas MDC-19 y MDC-25 se presentan en las tablas 8 y 9, respectivamente. Se reporta, que el contenido óptimo de asfalto es de 5,5% y 5,0% para las mezclas MDC-19 y MDC-25, respectivamente.

Tabla 8. Resultados ensayo Marshall MDC-19.

| CA [%] | Estabilidad - E [kN] | Flujo - F [mm] | E/F [kN/mm] | Vacios [%] |
|--------|----------------------|----------------|-------------|------------|
| 4,5 | 11,81 | 3,86 | 3,06 | 6,15 |
| 5,0 | 12,51 | 3,73 | 3,35 | 4,08 |
| 5,5 | 11,60 | 3,91 | 296,70 | 2,73 |
| 6,0 | 11,67 | 4,14 | 281,86 | 1,51 |

Tabla 9. Resultados ensayo Marshall MDC-25.

| CA [%] | Estabilidad - E [kN] | Flujo - F [mm] | E/F [kN/mm] | Vacios [%] |
|--------|----------------------|----------------|-------------|------------|
| 4,5 | 11,75 | 3,96 | 2,97 | 5,69 |
| 5,0 | 12,86 | 3,81 | 3,38 | 5,04 |
| 5,5 | 13,13 | 3,84 | 3,42 | 4,17 |
| 6,0 | 12,30 | 4,14 | 2,97 | 1,93 |

El ensamble de las muestras para desarrollar los ensayos de flexión fue realizado en moldes específicos para la investigación, donde se variaron la cantidad del cemento asfáltico, granulometría y el espesor de la probeta de mezclas asfáltica (Figura 5).

Fueron manufacturadas en total 32 especímenes que fueron ensayados mediante carga monotónica a flexión, hasta la carga máxima, midiendo la flecha ocurrida en el centro de la probeta, en el momento que el equipo utilizado, dejase de registrar aumento de carga aplicada a la muestra. En la Figura 6 es posible observar el esquema típico del ensayo ejecutado sobre las muestras elaboradas según las especificaciones requeridas.

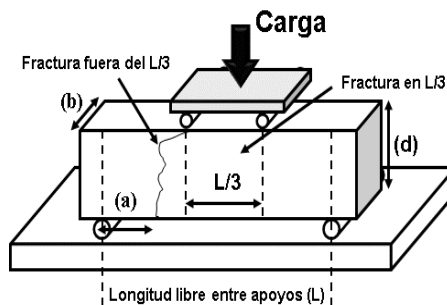


Figura 6. Esquema típico del ensayo

En ensayos preliminares de calibración se observó que el equipo es muy sensible a la velocidad de carga, para una velocidad muy alta el registro de carga máxima podría darse de manera súbita en

cualquier momento de la prueba. En la Figura 7 se puede observar el montaje del ensayo y la medición de la deformación en el centro del espécimen (detalle en la esquina superior derecha).

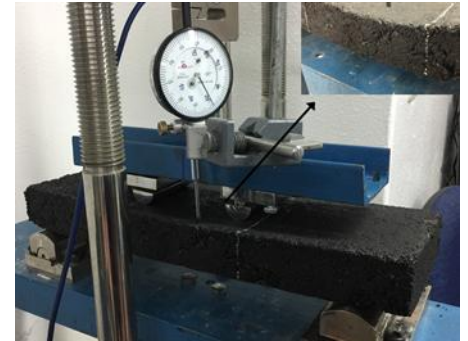


Figura 7. Montaje y operación del ensayo

Fueron ensayadas 32 muestras donde se midió la máxima carga aplicada (P) sobre el espécimen, en el momento que reveló la fractura de forma visible. Además, se consideraron otros aspectos importantes en el proceso de falla de la probeta como ancho en la zona de falla (b), altura en la zona de falla (d), longitud libre entre apoyos (L) y distancia entre la línea de fractura y el apoyo más cercano (a). Para mejor entendimiento de los aspectos involucrados consultar la Figura 6.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 10 es posible analizar los resultados de muestras de 5 cm de espesor, elaboradas con 5% CA y mezcla densa en caliente tipo MDC-19. Es importante resaltar que, para estos especímenes, los valores obtenidos de carga máxima puntual soportada han sido relativamente bajos, respuesta que se esperaba dado el espesor tan bajo escogido para elaborar las muestras.

Tabla 10. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para especímenes de 5 cm de espesor (CA 5%, MDC-19)

| Ref (cm) | Muestra 1 | | | Muestra 2 | | |
|----------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| b (| 15,0 | 15,07 | 15,05 | 15 | 15,06 | 15,03 |
| d | 5,1 | 5,2 | 5,3 | 5,2 | 5,2 | 5,1 |
| L | 42 | | | 42 | | |
| a | 22,0 | 21,0 | 20,8 | 20,8 | 21 | 21,3 |
| P | 0,53 kN | | | 0,68 kN | | |
| Ref (cm) | Muestra 3 | | | Muestra 4 | | |
| b | 15,0 | 15,06 | 15,03 | 15,0 | 14,9 | 15,1 |
| d | 5,2 | 5,2 | 5,1 | 5,3 | 5,0 | 5,1 |
| L | 42 | | | 42 | | |
| a | 20,8 | 21,0 | 21,3 | 20,1 | 20,6 | 20,4 |
| P | 0,68 kN | | | 0,65 kN | | |
| Ref (cm) | Muestra 5 | | | Muestra 6 | | |
| b | 15,2 | 15,3 | 15,2 | 15,0 | 15,06 | 15,03 |

| | | | | | | |
|----------|-----------|------|------|-----------|------|------|
| d | 5,3 | 5,2 | 5,0 | 5,2 | 5,2 | 5,1 |
| L | 42 | | | 42 | | |
| a | 20,2 | 20,1 | 20,8 | 20,8 | 21,0 | 21,3 |
| P | 0,70 kN | | | 0,68 kN | | |
| Ref (cm) | Muestra 7 | | | Muestra 8 | | |
| b | 15,0 | 14,9 | 15,1 | 15,2 | 15,3 | 15,2 |
| d | 5,3 | 5,0 | 5,1 | 5,3 | 5,2 | 5,0 |
| L | 42 | | | 42 | | |
| a | 20,1 | 20,6 | 20,4 | 20,2 | 20,1 | 20,8 |
| P | 0,65 kN | | | 0,70 kN | | |

En la Tabla 11 se pueden observar los resultados para una muestra de 5 cm de espesor, elaborada con 5,5% CA y mezcla densa en caliente tipo MDC-19. La muestra No.2 de 10 cm de espesor igualmente con 5,5% CA, pero elaborada con MDC-25.

Tabla 11. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para diferentes especímenes de 5 cm y 10 cm de espesor

| | | | | | | |
|----------|-----------|------|------|-----------|-------|-------|
| Ref (cm) | Muestra 1 | | | Muestra 2 | | |
| b (| 15,03 | 14,9 | 15,1 | 15,0 | 15,06 | 15,08 |
| d | 5,1 | 9,9 | 10,2 | 10,1 | 5,1 | 5,2 |
| L | 42 | | | 42 | | |
| a | 19,0 | 20,0 | 19,9 | 19,8 | 21,0 | 23,0 |
| P | 0,68 kN | | | 6,17 kN | | |

En cuanto a probetas de 10 cm de espesor, elaboradas con 5% CA y mezcla densa en caliente tipo MDC-19, en la Tabla 12 se muestran los resultados de las cargas máximas soportadas. En especímenes de 10 cm se nota el aumento de la carga soportada, en aproximadamente diez veces al de las muestras de 45 cm de espesor.

Tabla 12. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para especímenes de 10 cm de espesor (CA 5%, MDC-19)

| | | | | | | |
|----------|-----------|------|------|-----------|------|------|
| Ref (cm) | Muestra 1 | | | Muestra 2 | | |
| b (| 14,8 | 15,0 | 14,9 | 14,9 | 15,1 | 15,0 |
| d | 10,1 | 10,0 | 10,3 | 10,0 | 10,1 | 10,1 |
| L | 42 | | | 42 | | |
| a | 19,15 | 20,1 | 20,3 | 20,2 | 20,0 | 20,1 |
| P | 4,60 kN | | | 4,60 kN | | |
| Ref (cm) | Muestra 3 | | | Muestra 4 | | |
| b (| 14,9 | 15,0 | 14,9 | 15,1 | 15,2 | 15,0 |
| d | 10,2 | 10,0 | 10,1 | 10,2 | 10,3 | 10,0 |
| L | 42 | | | 42 | | |
| a | 20,0 | 20,9 | 20,7 | 21,0 | 20,9 | 20,8 |
| P | 4,56 kN | | | 4,45 kN | | |

En la Tabla 13 se pueden observar los resultados de muestras de 10 cm de espesor, elaboradas con 5% CA y mezcla densa en caliente tipo MDC-19. Comparando con muestras similares mostradas en la Tabla 10 y cuya única diferencia es el contenido de asfalto, los resultados revelan que los especímenes con 5,5% de CA presentan un menor comportamiento ante la carga motónica a flexión.

Tabla 13. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para especímenes de 10 cm de espesor (CA 5,5%, MDC-19)

| | | | | | | |
|----------|-----------|-------|------|-----------|------|------|
| Ref (cm) | Muestra 1 | | | Muestra 2 | | |
| b (| 14,3 | 14,5 | 15,0 | 15,2 | 15,3 | 15,0 |
| d | 10,2 | 10,07 | 10,0 | 10,1 | 10,0 | 10,0 |
| L | 42 | | | 42 | | |
| a | 20,1 | 21,0 | 20,9 | 19,9 | 20,0 | 20,3 |
| P | 4,81 kN | | | 4,81 kN | | |
| Ref (cm) | Muestra 3 | | | Muestra 4 | | |
| b (| 15,1 | 14,9 | 15,2 | 15,0 | 15,0 | 15,3 |
| d | 10,2 | 10,0 | 10,1 | 10,3 | 10,3 | 10,0 |
| L | 42 | | | 42 | | |
| a | 20,8 | 21,0 | 20,7 | 21,9 | 21,6 | 21,4 |
| P | 4,99 kN | | | 5,12 kN | | |

En la Tabla 14 se pueden observar los resultados de muestras de 10 cm de espesor, elaboradas con 5% CA y mezcla densa en caliente tipo MDC-25. En cuanto a muestras similares elaboradas con una MDC diferente, estas probetas poseen una mejor respuesta ante la carga a flexión.

Tabla 14. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para especímenes de 10 cm de espesor (CA 5%, MDC-25)

| | | | | | | |
|----------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| Ref (cm) | Muestra 1 | | | Muestra 2 | | |
| b (| 15,0 | 14,97 | 15,02 | 15,1 | 15,0 | 15,1 |
| d | 10,0 | 10,03 | 10,04 | 10,0 | 10,1 | 10,1 |
| L | 42 | | | 42 | | |
| a | 21,0 | 20,0 | 21,0 | 20,8 | 20,73 | 20,6 |
| P | 5,72 kN | | | 5,72 kN | | |
| Ref (cm) | Muestra 3 | | | Muestra 4 | | |
| b (| 14,9 | 15,1 | 15,1 | 15,0 | 15,14 | 15,2 |
| d | 10,07 | 10,1 | 10,09 | 10,1 | 10,12 | 10,14 |
| L | 42 | | | 42 | | |
| a | 20,3 | 20,5 | 20,6 | 21,0 | 20,9 | 20,8 |
| P | 7,59 kN | | | 5,59 kN | | |
| Ref (cm) | Muestra 5 | | | Muestra 6 | | |
| b (| 15,1 | 15,1 | 15,15 | 15,0 | 15,09 | 15,07 |
| d | 9,9 | 10,1 | 10,08 | 10,07 | 10,1 | 10,09 |
| L | 42 | | | 42 | | |
| a | 21,0 | 20,09 | 20,2 | 20,07 | 20,0 | 20,09 |
| P | 6,17 kN | | | 6,29 kN | | |
| Ref (cm) | Muestra 7 | | | | | |
| b (| 15,0 | 15,03 | 15,06 | | | |
| d | 10,05 | 10,07 | 10,1 | | | |
| L | 42 | | | | | |
| a | 21,2 | 21,17 | 21,18 | | | |
| P | 6,06 kN | | | | | |

La Tabla 15 describe los resultados de muestras de 5 cm de espesor, elaboradas con 5% CA y mezcla densa en caliente tipo MDC-25.

Tabla 15. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para especímenes de 5 cm de espesor (CA 5%, MDC-25)

| | | | | | | |
|----------|-----------|-------|------|-----------|------|-------|
| Ref (cm) | Muestra 1 | | | Muestra 2 | | |
| b (| 15,0 | 14,8 | 15,1 | 15,08 | 15,1 | 15,07 |
| D | 4,99 | 5,0 | 5,03 | 5,0 | 5,1 | 5,09 |
| L | 42 | | | 42 | | |
| A | 21,0 | 20,7 | 20,8 | 20,6 | 20,5 | 21,0 |
| P | 0,60 kN | | | 0,70 kN | | |
| Ref (cm) | Muestra 3 | | | | | |
| b (| 15,12 | 15,15 | 15,1 | | | |
| D | 5,07 | 5,05 | 5,0 | | | |

| | | | | | | |
|---|---------|------|------|--|--|--|
| L | 42 | | | | | |
| A | 20,9 | 20,1 | 20,5 | | | |
| P | 0,67 kN | | | | | |

Para muestras de 5 cm de espesor, elaboradas con 5,5% CA y mezcla densa en caliente tipo MDC-25, revisar los resultados en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados de los ensayos de carga puntual monotónica para especímenes de 5 cm de espesor (CA 5%, MDC-25)

| | | | | | | |
|----------|-----------|------|------|-----------|------|------|
| Ref (cm) | Muestra 1 | | | Muestra 2 | | |
| b (| 15,2 | 15,4 | 15,3 | 15,10 | 15,2 | 15,1 |
| D | 5,0 | 5,08 | 5,1 | 5,1 | 5,07 | 5,14 |
| L | 42 | | | 42 | | |
| a | 21,0 | 20,9 | 21,0 | 20,8 | 20,5 | 19,9 |
| P | 0,80 kN | | | 0,93 kN | | |
| Ref (cm) | Muestra 3 | | | | | |
| b (| 15,0 | 15,2 | 15,0 | | | |
| d | 5,0 | 5,03 | 5,07 | | | |
| L | 42 | | | | | |
| a | 19,8 | 20,0 | 20,1 | | | |
| P | 0,83 kN | | | | | |

La Tabla 17 muestra de mejor manera los resultados obtenidos, de acuerdo con los parámetros modificados en la mezcla.

Tabla 17. Resumen de resultados

| | | | | | | |
|----------------------|----------|------|------|------------|------|------|
| Mezcla | MDC-19 | | | | | |
| Variables | 5%, 5cm | | | 5,5%, 5cm | | |
| Carga Max. [kN] | 0,53 | 0,61 | 0,59 | 0,68 | 0,65 | 0,70 |
| Def. [in/1000] | 175 | 180 | 185 | 190 | 200 | 200 |
| Prom. carga [kN] | 0,58 | | | 0,68 | | |
| Prom. Def. [in/1000] | 180 | | | 197 | | |
| Variables | 5%, 10cm | | | 5,5%, 10cm | | |
| Carga Max. [kN] | 4,6 | 4,56 | 4,45 | 4,81 | 4,99 | 5,12 |
| Def. [in/1000] | 170 | 160 | 155 | 160 | 175 | 170 |
| Prom. carga [kN] | 4,54 | | | 4,97 | | |
| Prom. Def. [in/1000] | 162 | | | 168 | | |
| Mezcla | MDC-25 | | | | | |
| Variables | 5%, 5cm | | | 5,5%, 5cm | | |
| Carga Max. [kN] | 0,60 | 0,70 | 0,67 | 0,80 | 0,93 | 0,83 |
| Def. [in/1000] | 265 | 255 | 250 | 240 | 255 | 250 |
| Prom. carga [kN] | 0,66 | | | 0,85 | | |
| Prom. Def. [in/1000] | 257 | | | 248 | | |
| Variables | 5%, 10cm | | | 5,5%, 10cm | | |
| Carga Max. [kN] | 5,72 | 5,79 | 5,59 | 6,17 | 6,29 | 6,06 |
| Def. [in/1000] | 185 | 175 | 170 | 195 | 195 | 210 |
| Prom. carga [kN] | 5,70 | | | 6,17 | | |
| Prom. Def. [in/1000] | 177 | | | 200 | | |

6 CONCLUSIONES

De acuerdo con el objetivo principal planteado en la investigación, los resultados obtenidos mediante el análisis de cargas monotónicas a flexión son un indicador inicial que brinda luces valiosas para posteriores estudios donde se aplican cargas repetitivas a especímenes de las mismas características, utilizados en este trabajo.

La caracterización no convencional de materiales, cobra gran importancia hoy en día, incluso para programar y diseñar las pruebas centrales de la investigación. En especial ensayos DRX, FRX y estudios de imagenología (SEM) contribuyen con resultados que pueden ayudar al investigador a explicar comportamientos mecánicos que no están ligados directamente a la interacción mecánica entre partículas, sino a componentes mineralógicos, químicos e incluso relacionados con la porosidad superficial del agregado, así como de su microestructura interna.

En el caso particular los agregados exhiben en promedio una porosidad superficial baja, esto puede incidir en que el material bituminoso eventualmente sea más susceptible a fenómenos como el *stripping*, ya que el asfalto no se va a adherir tan fácilmente a la superficie específica del agregado natural.

Las probetas que físicamente en sus dimensiones y características de los materiales mostraban una robustez evidente, presentaron un mejor comportamiento mecánico en términos de deformación máxima, es decir los especímenes con espesor de 10 cm y CA de 5,5%, tuvieron la mejor respuesta.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM standard D7460 (1996). *Standard test compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending*.
- Bonnot, J. (1986). *Asphalt Aggregate Mixtures. Transportation Research Record 1096*, Transportation Research Board, Washington, D. C. pp: 42-50.
- Elices, M., Guinea, G., Planas, J. (1992). *Measurement of the fracture energy using three-point bend tests Part 3-Influence of cutting the P-u tail*. Materials and Structures, 25, pp. 327-334.
- Hu, S., Zhou, F., Walubita, L.F. (2009) *Development of a viscoelastic finite element tool for asphalt pavement low temperature cracking analysis*. Road Mater Pavement Des 10(4):833-858.
- Hveem, F.N. (1955). *Pavement Deflections and Fatigue Failures*, Highway Research Board, Bulletin 114, Washington D.C., 1955.
- Kliwer, J.E., Zeng, H. & Vinson T. (1996). *Aging and Low-Temperature Cracking of Asphalt Concrete Mixture* Journal of Cold Regions Engineering Vol. 10, Issue 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(1996\)10:3\(134\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(1996)10:3(134))
- Li, N. (2013). *Asphalt mixture fatigue testing. Influence of Test Type and Specimen Size*. PhD Thesis. Faculty of Civil Engineering and Geosciences. Delft University of Technology.
- Li, X., Marasteanu, M.O. (2005) *Cohesive modeling of fracture in asphalt mixtures at low temperatures*. Int J Fract 136(1-4):285-308
- Meena, P.K., Saha, G. & Biligiri, K.P. (2016). *Estimation of fatigue life using resilient moduli of asphalt mixtures*. J Test Eval. 44(1):424-438.
- Molenaar, A.A.A. (1983). *Structural Performance and Design of Flexible Road Construction and asphalt Concrete Overlays*, Ph.D Thesis, Delf University of Technology, the Netherlands.
- Molenaar, J.M.M (1987), *Standard execution of the dynamic four-point bending test*; Report MAO-R-87060; RHED; Delft.
- Montepara A, Tebaldi G, & Costa, A. (2004) *Relation between crack growth parameters and mechanical characteristics in high modulus asphalt concrete*. In: Proceeding of 5th International RILEM conference, pp 647-654
- Moon, K.H., Falchetto, A.C., Marasteanu, M.O. (2014). *Investigation of limiting criteria for low temperature cracking of asphalt mixture*. KSCE J Civil Eng 18(1):172-181
- Moreno, F., Rubio, M.C. (2013) *Effect of aggregate nature on the fatigue-cracking behavior of asphalt mixes*. Mater Des 47:61-67.
- Nijboer & van der Poel (1953). *A study of vibration phenomena in asphaltic road constructions*. Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1953, No. 22, pp:197- 231.
- Pell, P.S. (1962). *Fatigue characteristics of bitumen and bituminous mixes*. International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. University of Michigan, Ann Arbor. Department of Civil Engineering. 203. 43-58.
- Porter, O.J. (1942). *Foundations for Flexible Pavements*, Proceedings, Highway Research Board, Washington, D.C.
- Raithby, K. D. & Sterling, A. B. (1972). *Some Effects of Loading History on the Performance of Rolled Asphalt*, TRRL-LR 496, Crowthorne, England.
- Roque, R., Birgisson, B., Drakos, C., & Dietrich, B. (2004). *Development and field evaluation of energy-based criteria for top-down cracking performance of hot mix asphalt*. J. Assoc. Asphalt Paving Technol., 73, 229-260.
- Saha, G., & Biligiri, K.P. (2015). *Fracture damage evaluation of asphalt mixtures using semi-circular bending test based on fracture energy approach*. Eng. Fract. Mech., 142, 154-169.
- Tangella S. R., Craus J., Deacon J. A. & Monismith C. L. (1990). *Summary report on fatigue response of asphalt mixtures*. SHRP Report TM-UCB-A-003A-89-3 for project A-003-A, University of California, Berkeley.p
- Tayebali, A. A., Deacon, J. A., Coplantz, J. S., & Monismith, C. L. (1993). *Modeling fatigue response of asphalt-aggregate mixtures*. J. Assoc. Asphalt Paving Technol., 62, 285-421.
- van Dijk, W & Moreaud, H. (1972). *The Fatigue of Bitumen and Bituminous Mixes*, 3th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements (ISAP), London, 1972, Volume 1.
- van Dijk, W. (1975). *Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes*, Proceedings The Association of Asphalt Paving Technologists.
- Van Dijk, W. & Visser, W. (1977). *The Energy Approach to Fatigue for Pavement Design*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 46: 1-37.
- Verstraeten, J. (1972), *Moduli and Critical Strains in Repeated Bending of Bituminous Mixes, Application to Pavement Design*, Proceedings 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London.
- Zheng, M., Li, P., Yang, J, Li, H., Qiu, Y. & Zhang, Z. (2017). *Fatigue Life Prediction of High Modulus Asphalt Concrete Based on the Local Stress-Strain Method*. Applied Sciences. 7, 305; doi:10.3390/app7030305