

Caracterización mecánica de mezclas asfálticas en función del origen y gradación del agregado pétreo*

Recibido: 21 de mayo de 2013. ● Aceptado: 24 de septiembre de 2013.

**Mechanic Characteristics of Asphalt
Mixtures as a Function of the Origin and
Gradation of Quarried Aggregate**

**Caractérisation des propriétés mécaniques
de mélanges bitumineux selon l'origine
et la gradation de l'agrégat pierreux**

**Caracterização mecânica de misturas
betuminosas em função da origem e
gradação dos agregados pétreos**

*Oscar Javier Reyes-Ortiz^a
Javier Fernando Camacho-Tauta^b
Angie Londoño León^c*

** Artículo de Investigación asociado al proyecto ING-1185 Comportamiento mecánico y dinámico de mezclas asfálticas frías financiado por la Universidad Militar Nueva Granada.*

a Ingeniero Civil de la Universidad de los Andes. Magister en Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes. Doctor en Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Cataluña. Profesor Titular de la Universidad Militar Nueva Granada. Comentarios a: oscar.reyes@unimilitar.edu.co

Resumen. El objetivo principal de la investigación es profundizar el conocimiento acerca de la influencia que el origen y gradación del agregado pétreo pueden tener en el comportamiento de mezclas asfálticas. Se realizó el análisis petrográfico macroscópico de gravas y arenas provenientes de la cantera del río Coello-Tolima (Cantol) y de la fuente aluvial del río Tunjuelito-Cundinamarca (Cancun). Se seleccionaron dos tipos de granulometría según las especificaciones del Instituto de Desarrollo Urbano (md12 y md20).

El porcentaje óptimo de asfalto se determinó mediante la metodología Marshall. Los ensayos realizados a las mezclas asfálticas fueron la Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI) en estados seco y húmedo, la Resistencia Conservada (RC) y el Módulo Resiliente (MR). La mitad de las muestras fueron envejecidas mediante el empleo de un horno a 80°C, con circulación de aire. Dentro de los resultados encontrados se pudo establecer que las probetas con granulometría md20 (independiente del origen del granular) tienen mayor densidad (RTI y MR) que las probetas md12. Así mismo, los resultados de RTI de las probetas Cantol en comparación con las probetas Cancun fueron mayores para los estados seco y envejecido a 48 horas. En el estado húmedo, tanto para la mezcla asfáltica md20 como la md12, los valores de RTI y RC de las probetas Cancun fueron mayores. Finalmente se determinó que los módulos resilientes de las probetas Cancun fueron considerablemente menores en comparación con las probetas Cantol, sin distinción de estado. Estos resultados ponen de manifiesto en el caso de estudio, que el origen del granular y la granulometría afectan las propiedades mecánicas y dinámicas de las mezclas asfálticas.

Palabras Clave. Granulometría; Mezcla asfáltica; Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI); Resistencia Conservada (RC); Origen de los agregados.

Abstract. The main goal of this research is to deepen knowledge about the possible influence of the origin and gradation of the aggregates on the mechanic behavior of asphalt mixtures. A macroscopic petrographic analysis was done on selected samples of graves and sands from a quarry located near the Coello River in Tolima (Cantol) and from a quarry located near the Tunjuelito River in Cundinamarca (Cancun). Two types of granulometry were selected according to the specifications of the Institute of Urban Development (md12 and md20).

The optimum percentage of asphalt was estimated by use of the Marshall's methodology. Laboratory tests on the asphalt mixtures included: dry and moist indirect tensile strength (ITS), moisture damage (MD) and resilient modulus (MR). Half of the samples were subjected to aging in an oven at 80 ° C with air circulation. Results show that specimens with gradation md20, independently of the origin of the soil particles, have higher density, ITS and MR than the specimens with gradation md12. Moreover, ITS results from Cantol specimens were higher than the same results from Cancun specimens for dry and aged at 48 hours. In the moist condition, md20 and md12 Cancun asphalt mixtures had high values of ITS and MD tests. Finally, it was found that MR results of Cancun specimens were considerably lower than Cantol specimens for any moist or ageing condition. For the materials studied, results show that the origin of the material and the gradation characteristics affect the mechanic properties of the asphalt mixture.

Keywords. Aggregates gradation; Asphalt Mixture; Indirect Tensile Strength (ITS); Resilient Modulus (RM); moisture damage (MD); Origin of the Aggregates.

b Ingeniero Civil de la Universidad Militar Nueva Granada. Magister en Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes. Doctor en Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Lisboa. Profesor Asociado de la Universidad Militar Nueva Granada. Comentarios a: javier.camacho@unimilitar.edu.co

c Ingeniera Civil de la Universidad Militar Nueva Granada. Comentarios a: angie.londono@unimilitar.edu.co

Résumé. Le principal objectif de la recherche est d'approfondir les connaissances sur l'influence que l'origine et gradation de l'agrégat pierreux peuvent avoir sur le comportement de mélanges bitumineux. On a réalisé l'analyse pétrographique macroscopique de sable et de gravier de carrière de la rivière Coello-Tolima (Cantol) et des cônes d'origine alluviale de la rivière Tunjuelito au Cundinamarca (Cancun). Deux types de granulometrie ont été choisies, suivant les spécifications fournies par l'Institut de développement urbain (md12 et md20).

Le pourcentage optimal d'asphalte a été déterminé par la méthode Marshall. Les essais effectués sur les mélanges bitumineux étaient la résistance de traction indirecte (RTI) aux états sec et humide, la résistance conservée (RC) et le module de résilience (MR). La moitié des échantillons étaient âgés en utilisant un four à 80°C, avec circulation d'air. Les résultats montrent que les spécimens avec gradation MD20, indépendamment de l'origine des particules du sol, ont une densité (RTI et RC) plus élevée que les spécimens avec gradation MD12. En outre, les résultats de la RTI provenant de spécimens Cantol étaient plus élevés que les mêmes résultats provenant de spécimens Cancun à l'état sec et vieilli pendant 48 heures. À l'état humide, MD20 et MD12 mélanges d'enrobé de Cancun avaient des valeurs élevées de ses essais RTI et MD. Enfin, il a été constaté que les résultats du MR des spécimens Cancun étaient considérablement plus faibles que les spécimens Cantol pour toute condition d'humidité ou de vieillissement. Pour les matériaux étudiés, les résultats montrent que l'origine du matériel et les caractéristiques de gradation affectent les propriétés mécaniques de l'enrobé bitumineux.

Mots-clés. Granulométrie; Mélanges bitumineux; Résistance de traction indirecte (RTI); module de résilience (MR); Résistance conservée (RC); Origine des agrégats..

Resumo. O principal objetivo da pesquisa é aprofundar no conhecimento da influencia que poder ter a origem e gradação dos agregados no comportamento da mistura betuminosa. Realizou-se o analise petrográfico macroscópico das gravas e areias da pedreira do rio Coello-Tolima (Cantol) e da pedreira aluvional do rio Tunjuelito-Cundinamarca (Cancun). Foram selecionados dois tipos de granulometria segundo as especificações do Instituto de Desarrollo Urbano (md12 e md20).

A porcentagem ótima de betumem foi determinada com a metodologia Marshall. A metade das amostras foi submetida a envelhecimento com forno a 80°C com circulação de ar. Os testes executados às misturas betuminosas foram: resistência à tração indireta (RTI) em estado seco e húmido, Resistencia conservada (RC) e modulo resiliente (MR). Nos resultados encontrados estabeleceu-se que as provetas com granulometria md20, independentemente da origem do agregado, tem maior densidade, RTI e Mr do que as provetas md12. Constatou-se também que, os resultados do RTI das provetas Cantol em estado seco e envelhecido por 48 horas, foram maiores do que os resultados do mesmo ensaio nas provetas Cancun. No estado húmido, as misturas betuminosas Cancun md20, bem como as provetas Cancun md12 tiveram maiores resultados. Por fim, determinou-se que os módulos resilientes das provetas Cancun foram consideravelmente menores do que os obtidos nas provetas Cantol, sem distinção do estado. Estes resultados evidenciam, no caso de estudo, que a origem do material granular e seu granulometria afetam as propriedades mecânicas e dinâmicas das misturas betuminosas.

Palavras-chave. Granulometria; Mistura Betuminosa; Resistencia à tração indireta (RTI); Módulo Resiliente (MR); Resistencia conservada (RC); Origem do Agregado.

Introducción

Las vías mueven los bienes y servicios de un país, por ende, son el motor de la economía. La mayoría de las vías en nuestro país están construidas con mezclas asfálticas, las cuales son producto de la unión de cemento asfáltico con materiales pétreos, según especificaciones técnicas. Su comportamiento mecánico y dinámico depende de las propiedades de la mezcla, como un todo y de las propiedades individuales de los materiales (Reyes, 2009). Referente a los agregados, conviene estudiar su origen y naturaleza, ya que todas las partículas provienen de una masa mayor, que puede haberse fragmentado por procesos naturales tales como el intemperismo y la abrasión o mediante la trituración mecánica, por lo cual la gran mayoría de sus propiedades y características dependen de la roca madre. (Delgado et ál., 2006). El asfalto, por su parte, proporciona una íntima unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos, igualmente mejora la capacidad portante de la estructura, permitiendo disminuir su espesor. (Maravi, 2012).

En cuanto a la mezcla asfáltica (agregado-asfalto-aditivos), uno de los parámetros de mayor relevancia para su análisis es el daño que causa el agua, ya que un diseño de pavimento puede tener defectos por una estimación errada en la dosificación de asfalto y agregado y, en consecuencia, porcentaje de vacíos muy bajos que al atrapar el agua o la humedad dentro de la estructura de las capas, tiende a aumentar la presión de poros o, en el caso contrario, generar valores muy altos en la permeabilidad, lo que es nocivo para la mezcla. De otra parte, la finura del polvo mineral y su afinidad por el agua es otro factor a considerar, ya que cuando el polvo mineral tiene afección por el agua, puede producirse una degradación en el tiempo de la estructura íntima de la mezcla, causando menor estabilidad y, por ende, riesgo de deformaciones inesperadas; por lo cual se hace necesario a través del ensayo de resistencia conservada, detectar el riesgo de degradación de la mezcla por la acción del agua sobre sus componentes minerales más finos. (Rodríguez, 2004).

Los daños por humedad pueden ser definidos como una disminución de resistencia y durabilidad en las mezclas asfálticas, estos deterioros pueden generarse debido a una pérdida de enlace entre el asfalto y los áridos finos o gruesos y se producen porque la humedad penetra y debilita la película de asfalto, efecto que es más susceptible a la humedad durante la carga cíclica. Los daños, en general, se traducen en la reducción de la resistencia estructural como consecuencia de una disminución o pérdida total de la cohesión, adhesión y pérdida de la rigidez en la mezcla. (Morea, 2011). Las fallas de adhesividad se evidencian normalmente en el desprendimiento de la película de asfalto de la superficie total y las fallas de cohesión se representan por el desprendimiento entre el mastico (filler- asfalto) y el agregado. (INVIAS, 2007).

El comportamiento de una mezcla asfáltica con respecto al estado de tensión en la fibra inferior de una estructura de pavimento, se puede simular en el laboratorio mediante el ensayo RTI. Diferentes autores han manifestado que características como el porcentaje de asfalto y el tipo de agregado influyen en dicho ensayo, ya que disminuir en un 1% el contenido de asfalto, supone reducir en un 12,3% su resistencia y en un 1,7% su densidad. (Torres et ál., 2006). El tipo de mezcla también influye sobre la resistencia, ya que se ha comprobado que las máximas resistencias se obtienen con las mezclas densas y, dentro de estas, aquellas que presentan un mayor contenido de árido fino. Sin embargo, es en húmedo (tras un tiempo de inmersión en agua a determinada temperatura) cuando se ponen de manifiesto las diferencias, especialmente el efecto que tiene tanto el árido granítico como el *filler* plástico para disminuir la adhesividad en la mezcla. Es más importante el análisis del efecto del árido blando granítico que el del *filler* plástico, pero, cuando se unen sus acciones, la resistencia de

la mezcla disminuye considerablemente, frente a los de la mezcla con árido y *filler* calizo. (Alshamsi, 2006).

Finalmente, en el diseño de pavimentos es fundamental el análisis del módulo resiliente, el cual caracteriza de manera racional el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales que conforman la estructura de un pavimento. A partir de estudios realizados por múltiples autores nacionales e internacionales, se ha determinado que el módulo resiliente varía según las características de la mezcla asfáltica como porcentaje de asfalto, densidad, porcentaje de vacíos y gradación del agregado. Una mezcla por contener mayor porcentaje de asfalto, es más deformable, lo que implica un valor de módulo resiliente menor. Referente a la densidad, al ser esta mayor, la mezcla asfáltica tiene menor porcentaje de vacíos, lo que hace que la deformabilidad de las probetas sea menor, con lo cual los valores de módulo resiliente son mayores. (Rubio, 2005). La gradación del agregado es uno de los factores más significativos, ya que el agregado más grueso proporciona mayor módulo resiliente en comparación con la gradación fina. Así mismo, el tiempo de aplicación de la carga afecta el módulo resiliente por la naturaleza visco-elástica de los materiales asfálticos, siendo más crítico a bajas frecuencias. (Saleh, 2006).

Son los factores anteriores los que fundamentan la investigación que se realizó, ya que determinar el efecto del origen de los materiales pétreos y su granulometría en las propiedades de una mezcla asfáltica cuando esta es sometida a condiciones variables de humedad y envejecimiento, repercuten en los mecanismos y procesos a seguir en el mejoramiento de la vida útil de la vía y, a largo plazo, en la reducción de costos de mantenimiento.

Por lo tanto, a partir de los estudios realizados por diversos autores, se planteó la presente investigación con la cual se analizaron los resultados de densidad, ensayos de RTI (seco y húmedo), MR y RC, de probetas con diferentes agregados, granulometrías y períodos de envejecimiento, determinando así el grado de influencia del origen y gradación del agregado pétreo en la caracterización mecánica y dinámica de las mezclas asfálticas estudiadas.

1. Metodología y materiales

La metodología empleada en el desarrollo de esta investigación aparece en la Figura 1, la cual inició con la caracterización del asfalto y el material granular utilizado. La primera parte consistió en analizar las petrografías de los agregados (arenas y gravas), seguido de la determinación del porcentaje óptimo de asfalto con la metodología Marshall de las mezclas a estudiar. Con estos resultados, se fabricaron muestras compactadas a 75 golpes por cara para realizar los ensayos de RTI en estado seco y húmedo, ensayos de MR en muestras envejecidas y sin envejecer y cálculo del RC. La cantidad de muestras fabricadas para ejecutar cada ensayo fue de siete. Por último, se analizaron los resultados y se determinó el efecto del origen del granular y la granulometría en las propiedades de las mezclas asfálticas ensayadas.

1.1 Características del granular

El origen del material utilizado en la investigación corresponde a dos canteras cuyo origen geográfico es diferente, el agregado pétreo denominado Cantol procede del río Coello, vereda Aguablanca, sector la Morena, Espinal (Tolima) y el agregado pétreo denominado Cancun, procede

del complejo industrial y minero el Tunjuelo, ubicado entre las avenidas Caracas y Boyacá, entre las calles 65 sur y 80 sur, Bogotá (Cundinamarca).

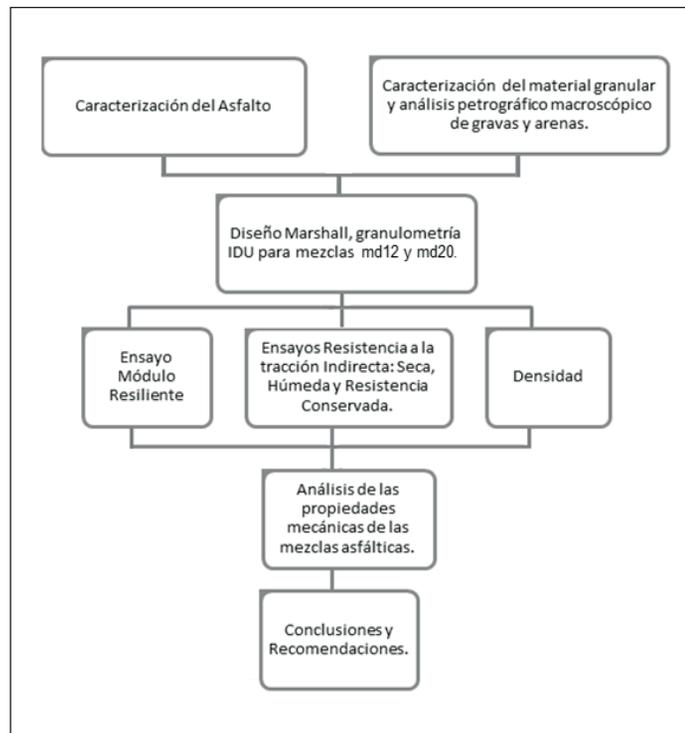


Figura 1. Diagrama de la metodología de la investigación

Fuente: Elaboración propia a partir de la investigación

Los agregados corresponden a terrazas aluviales formadas por el almacenamiento de materiales de arrastre transportados por la corriente de cada río y depositados en estas zonas a través de los años. El material pétreo se caracterizó por medio de los ensayos de laboratorio que se referencian en la Tabla 1.

Tabla 1. Ensayos de caracterización del material granular

Ensayo	Norma	Resultado Cantol	Resultado Cancun
Equivalente de arena [%]	INV. E-133	53,00	57,00
Resistencia al desgaste [%]	INV. E-218	23,00	29,90
Peso específico aparente agregado fino [g/cm ³ g/cm ³]	INV. E-222	2,61	2,60
Absorción agregado fino [%]	INV. E-222	1,30	1,10
Peso específico aparente agregado grueso [g/cm ³ g/cm ³]	INV. E-223	2,60	2,59
Absorción agregado grueso [%]	INV. E-133	1,80	1,60

Fuente: Elaboración propia a partir de la investigación.

1.2 Caracterización del asfalto

El asfalto empleado en la investigación es el denominado 60/70 por su penetración, presenta las características que se relacionan en la Tabla 2.

Tabla 2. Ensayos de caracterización de los asfaltos

Ensayo	Norma	Asfalto 60 - 70
Viscosidad dinámica a 135 °C [Pa,s]	INV. E-715	0,55
Penetración [1/10mm]	INV. E-706	70,00
Punto de ablandamiento [°C]	INV. E-712	48,00
Peso unitario del asfalto solido []	INV. E-707	1,019
Punto de ignición [°C]	INV. E-709	265,00
Punto de llama [°C]	INV. E-709	270,00

Fuente: Elaboración propia a partir de la investigación.

1.3 Curvas granulométricas

Las curvas granulométricas utilizadas en la investigación corresponden a la md-12 y md-20 del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU, 2005), centrada en su uso, tal y como aparece en la Figura 2.

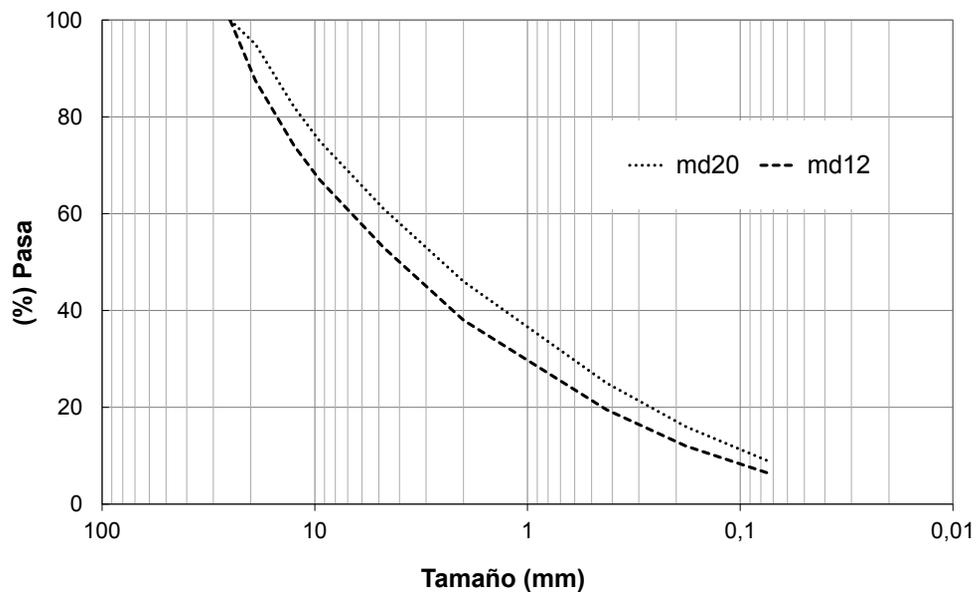


Figura 2. Curvas Granulométricas md20 y md12 de Instituto Desarrollo Urbano (IDU)

Fuente: (Instituto de Desarrollo Urbano, 2005)

1.4 Porcentaje óptimo de asfalto

El porcentaje óptimo de asfalto se determinó mediante el ensayo Marshall (INVIAS, 2007), con una energía de compactación de 75 golpes por cara, una variación del asfalto entre el 4,0 y 6,0 %, para mezclas md20 y entre el 5,0 y 7,0%, para mezclas md12, obteniendo el porcentaje óptimo de asfalto en 5,0%, para md20, y 5,9% para md12. Este resultado surge del análisis de densidad, estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos.

2. Análisis de resultados

Del estudio petrográfico y los ensayos realizados para caracterizar mecánicamente las mezclas asfálticas en función de su origen y gradación del agregado pétreo, se obtuvieron los siguientes resultados. A partir de la descripción macroscópica del agregado grueso de la cantera Cancun, se encontraron gravas de 1½" a menos de ¾", con predominio de color gris claro. La muestra está representada en un 97.4% por rocas de origen sedimentario, integradas por clastos de areniscas cuarzosas, areniscas feldespáticas, areniscas líticas, limolitas y chert, de tamaños que varían entre 0.5 cm a 4.0 cm.

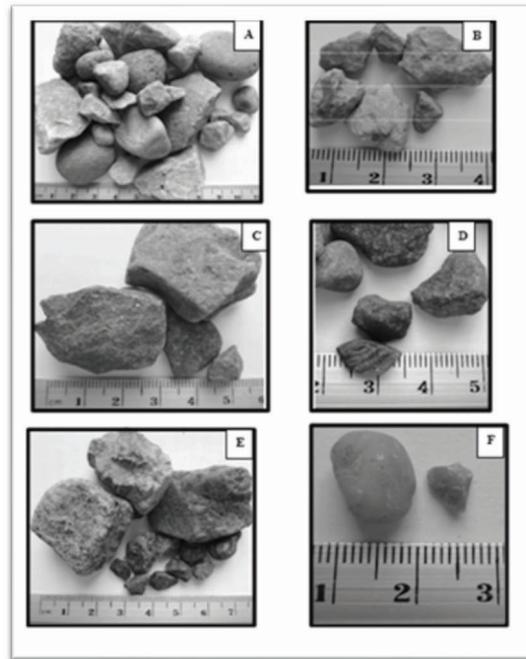


Figura 3. Fotografías de fragmentos de roca que conforman la grava Cancun.

Fuente: Informe técnico Congrescol S.A.

El resto de la fracción corresponde al 2.6% de la muestra y se halla integrada por fragmentos de cuarzo. En la Figura 3, se observan las fotografías de los fragmentos de roca anteriormente descritos.

En la Figura 3 se puede observar: A) Fragmentos de areniscas cuarzosas, B) Fragmento de areniscas líticas, C) Fragmentos de areniscas feldespáticas, (D) Fragmentos de limolitas silíceas, (E) Fragmentos de Chert con superficies cubiertas de material arcilloso y (F) Fragmento de cuarzo.

De otra parte, en la descripción macroscópica del agregado fino se encontraron arenas de color gris amarillento. La muestra está representada en un 77.3% por granos de cuarzo, de tamaño menor a 2.00 mm hasta limo fino menor a 88 μ . El resto de la fracción corresponde al 22.7% de la muestra y se halla integrada predominantemente por fragmentos de rocas sedimentarias, cuyo tamaño varía de 2mm a 10 mm, representadas por areniscas de variada composición y en menor proporción por fragmentos de chert. En la Figura 4 se observa una muestra de la arena triturada.



Figura 4. Fotografías de agregado fino (arenas) cantera Cancun.

Fuente: Informe técnico Concrecol S.A.

Con los análisis de las gravas y arenas de la cantera Cancun y al observar un predominio de chert que es una roca silícea densa y dura y la arenisca cuarzosa, que consta de granos de cuarzo de diferentes tamaños unidos por cemento silíceo, se determina que estos agregados contribuirán favorablemente a la resistencia mecánica de la mezcla asfáltica, ya que el cuarzo posee la mayor dureza que alcanzan los materiales usados en construcción (7 en la escala de Mohs). (Klein-Hurlbut, 2006).

La descripción macroscópica del agregado grueso de la cantera Cantol muestra gravas $\frac{3}{4}$ ", de color gris oscuro. La muestra está representada en un 40.1% por rocas de origen ígneo plutónico, integradas por clastos de granitos, dioritas, cuarzo dioritas y fragmentos aplíticos, de tamaños que varían entre 1.0 cm a 3.0 cm. El resto de la fracción corresponde al 59.9% de la muestra y se halla integrada predominantemente por clastos de rocas volcánicas (36.7%), cuyo tamaño varia de 1.5 cm a 2.0 cm, clastos de rocas piroclásticas (20%) representadas por fragmentos de tobas y pumitas y le sigue en menor proporción clastos de rocas Metamórficas (1.1%), representadas por fragmentos de esquistos, filitas y metarenitas. Por último, se encuentran fragmentos de cuarzo en un 2.1%. En la Figura 5, se aprecian los fragmentos de roca que conforman la Grava Cantol.

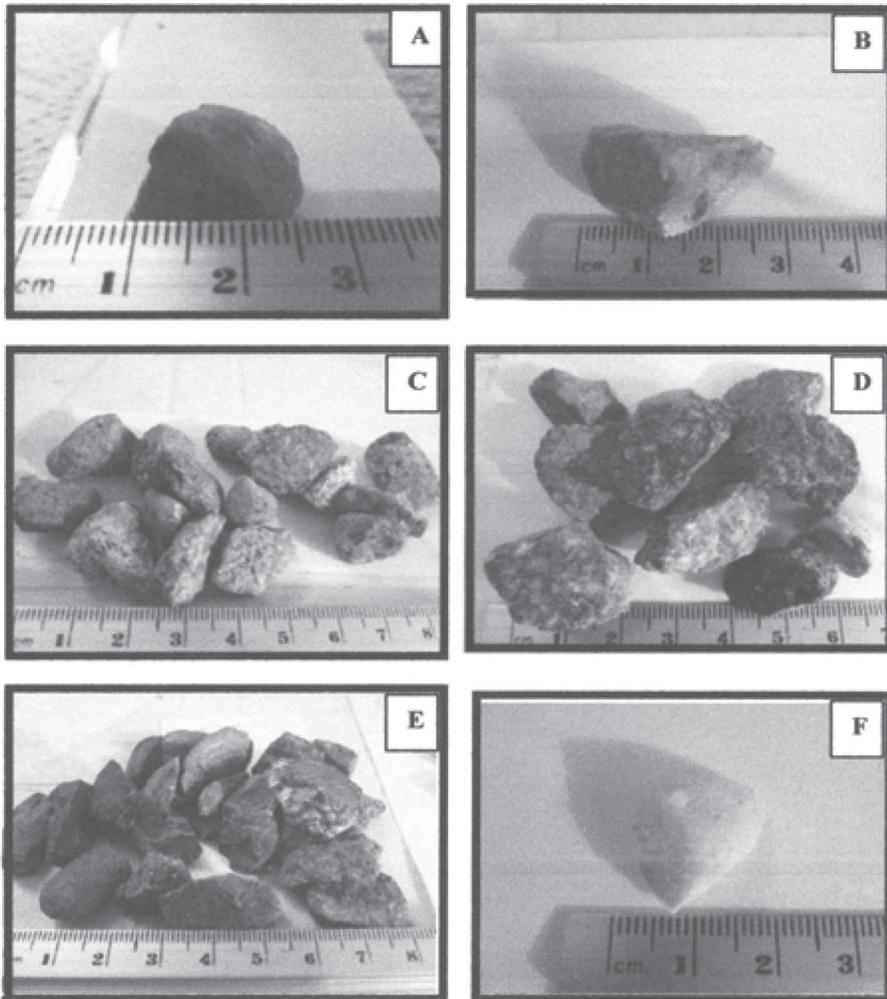


Figura 5. Fotografías de fragmentos de roca que conforman la grava Cantol.
Fuente: Informe técnico Concescol S.A.

En la Figura 5 se puede observar: A) Fragmentos areniscas, B) Fragmento de aplita, C) Fragmentos de pumita D) Fragmentos de andesita, E) Fragmentos de Chert con superficies cubiertas de material arcilloso y F) Fragmento de cuarzo.

Así mismo, a partir de la descripción macroscópica del agregado fino de la cantera Cantol, se observa la presencia de arenas de color gris medio amarillento. La muestra está representada en un 69.2% por fragmentos de cristales, integradas por cuarzo, plagio clasa, biotita y anfíbol, de tamaño menor a 2.00 mm, hasta limo fino menor a 81 μ . El resto de la fracción corresponde al 30.8% de la muestra y se halla integrada predominantemente por fragmentos de rocas ígneas volcánicas (14.6%), representadas por basaltos, andesitas y basaltos andesíticos, le sigue en menor proporción por fragmentos de roca piroclástica (9.0%), y en bajo contenido se encuentran fragmentos de rocas ígneas

plutónicas (7.1%), cuyo tamaño varía de 2 mm a 3.5 mm. En la Figura 6 se observan las fracciones de la arena triturada Cantol, pasada por tamices desde tamaño arena muy gruesa a limo grueso.

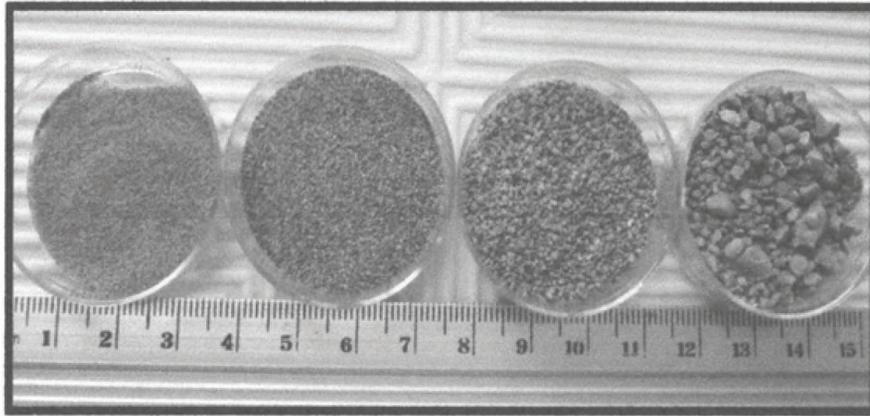


Figura 6. Fotografías de fragmentos de roca que conforman las arenas de la cantera Cantol.

Fuente: Informe técnico Concescol S.A.

De los resultados macroscópicos y el origen de los materiales de las gravas y arenas de la cantera Cantol, se puede establecer que al predominar el basalto y la presencia de rocas como la toba cristalina, diorita y cuarzodiorita en altas proporciones, estas ayudarán la resistencia mecánica de las mezclas asfálticas.

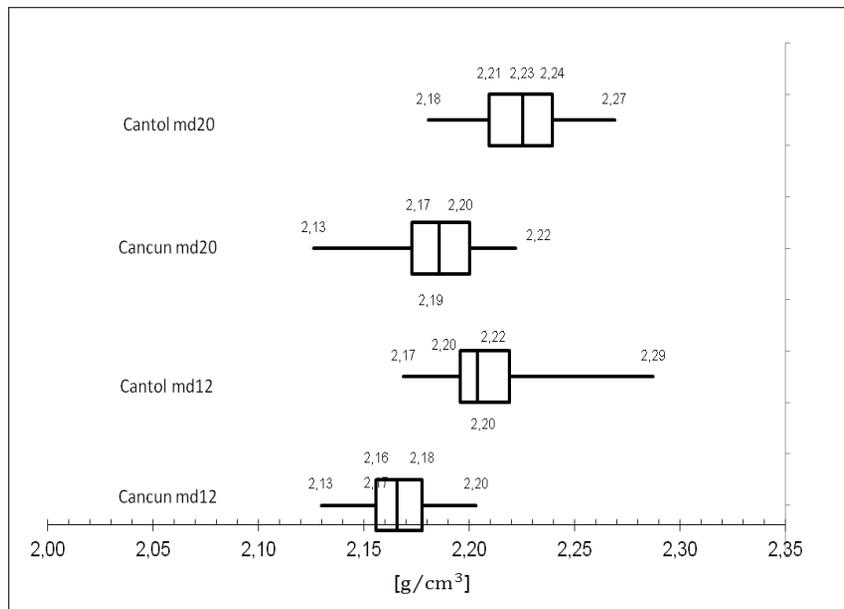


Figura 7. Densidad probetas con granulometría md12 y md20 y fabricadas con agregados de origen Cancun y Cantol.

Fuente: Elaboración propia a partir de la investigación

De la Figura 7, densidad de las mezclas asfálticas md12 y md20 fabricadas con agregados de las dos canteras (Cancun y Cantol), se evidencia que las probetas md20, independiente del origen del granular tienen mayor densidad que las probetas md12. Así mismo, las mezclas asfálticas con agregado de origen Tolima, presentan los mayores valores de densidad. En general los resultados no presentan dispersión alta de los datos, ya que a partir de los percentiles se observa que hay simetría, excepto para las probetas Cantol md12, para las cuales el extremo izquierdo (valor mínimo) es considerablemente más corto que el derecho (valor máximo) y el segmento derecho de la caja es mayor que el izquierdo, lo cual quiere decir que los valores de densidad comprendidos entre el 25% y el 50% del total de datos están menos dispersos que entre el 50% y el 75%.

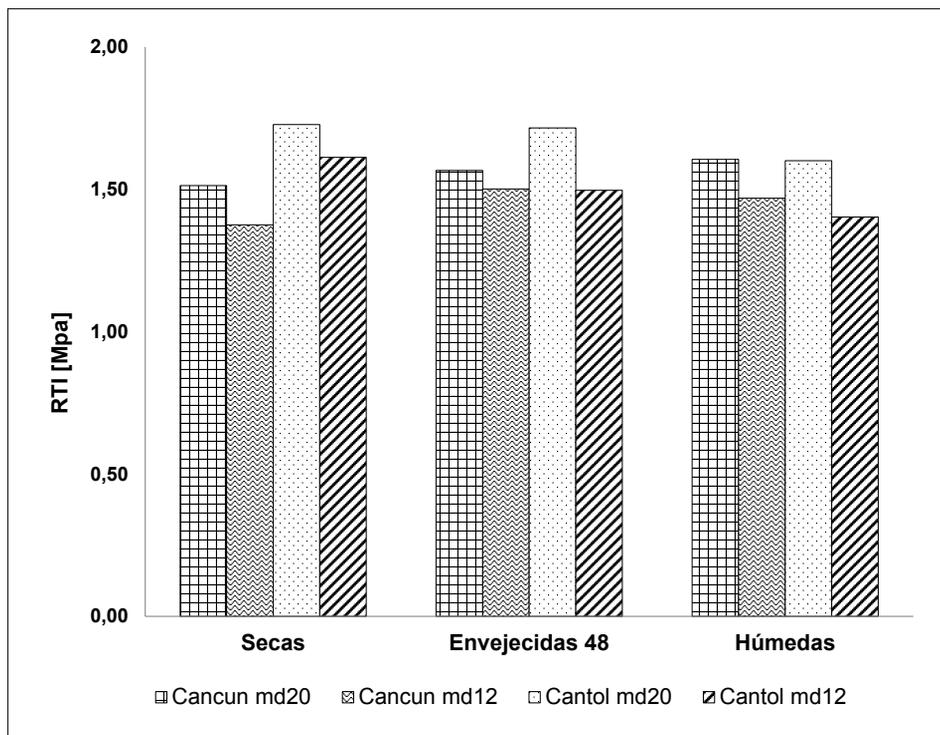


Figura 8. RTI a diferentes estados (húmedo, seco y envejecido a 48 horas) de probetas con granulometría md12 y md20 y fabricadas con agregados de origen Cancun y Cantol.

Fuente: Elaboración propia a partir de la investigación

De la Figura 8, RTI de las mezclas asfálticas ensayadas a diferentes estados (húmedo, seco y envejecido a 48h), se observa que para el estado húmedo a partir del origen de agregado, las probetas Cancun tienen mayor RTI que las probetas Cantol y con base en el tamaño del granular, las resistencias más altas se presentan para las mezclas md20 irrelevante de su origen. En el estado seco las probetas con agregados de origen Tolima poseen mayores valores de RTI que aquellas con agregados de Cundinamarca. Así mismo, se evidencian valores más altos para la mezcla md20. Aquellas probetas

que fueron envejecidas a 48 horas presentan en general los valores más altos de RTI sin distinción de origen o tamaño del granular. Por último, se estableció que a mayor densidad mayor resistencia.

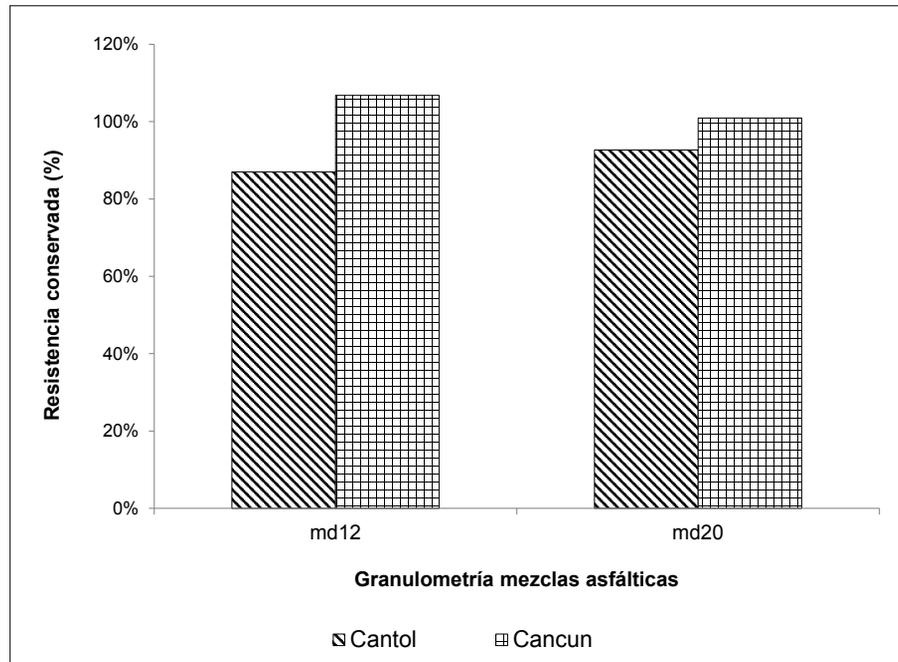


Figura 9. RC de probetas con granulometría md12 y md20 y fabricadas con agregados de origen Cancun y Cantol.

Fuente: Elaboración propia a partir de la investigación

De la Figura 9, se aprecia que la resistencia conservada $(RTI_{hum}/RTI_{sec})(RTI_{hum}/RTI_{sec})$, para las mezclas asfálticas con agregados de origen de la cantera Cancun es mayor, independiente de la granulometría. Para las mezclas md20 se observó un incremento del 13% y para las md12 del 19%, lo cual indica menor susceptibilidad al agua en comparación con las mezclas cuyos agregados provienen de la cantera Cantol. Se resalta que todas las mezclas cumplen con el límite inferior del 80%, como lo establece la norma INVIAS. (INVIAS, 2007).

De la Figura 10, módulos resilientes de mezclas asfálticas con agregados procedentes de la cantera Cantol, se observa que a pesar de la dispersión que posee el ensayo, la variación de los resultados obtenidos por granulometría y estado de la probeta (húmedo, seco, y envejecido a 48h) no es significativa. Sin embargo, se puede apreciar que las mezclas md12 tienen mayor módulo resiliente que las md20 para todos los estados, sin distinción de frecuencia utilizada (0.33, 0.5, 1.0 Y 2.5 Hz).

De la Figura 11, módulo resiliente de mezclas asfálticas fabricadas con agregados de la cantera Cancun, con granulometrías md12 y md20 y en estados seco, húmedo y envejecido, se puede observar que las mezclas con granulometría gruesa (md20) presentan los mayores módulos, independiente del estado de la probeta (seco, húmedo o envejecido) y la frecuencia utilizada (0.5, 1, 2.5 Hz). Con respecto a las mezclas con granulometría md12, se observa que la mezcla envejecida presenta los valores de módulo mayores, manifestando que el cambio de rigidez que experimenta una mezcla por

el efecto de las condiciones ambientales simuladas de la radiación solar, afecta de manera significativa las propiedades del material.

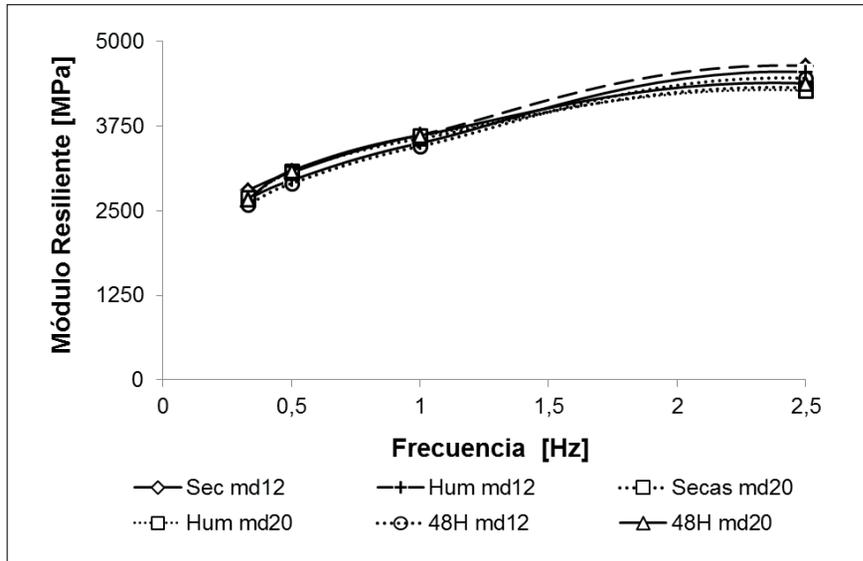


Figura 10. MR de probetas fabricadas con agregados de la cantera Cantol, con granulometría md12 y md20 y en estado seco, húmedo y envejecido.

Fuente: Elaboración propia a partir de la investigación

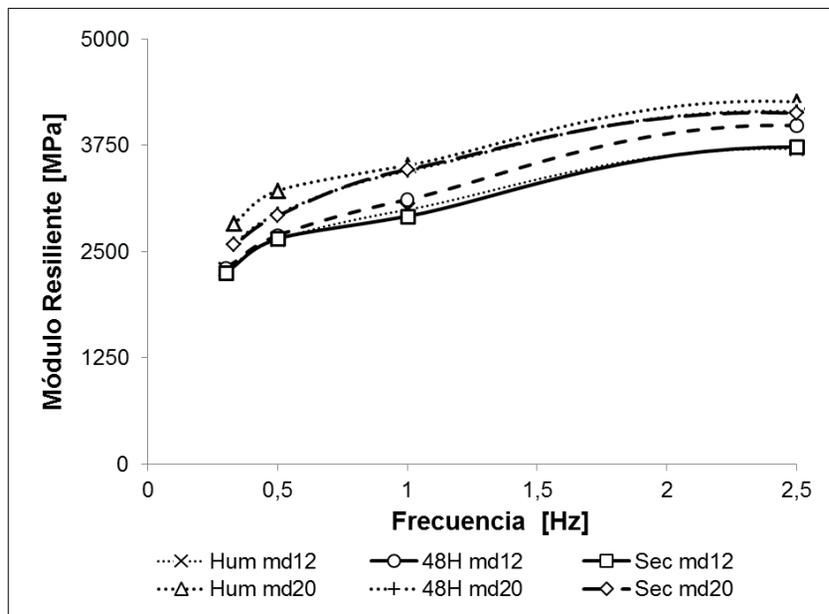


Figura 11. MR de probetas fabricadas con agregados de la cantera Cancun, con granulometría md12 y md20 y en estado seco, húmedo y envejecido.

Fuente: Elaboración propia a partir de la investigación

Como parte final de la investigación y con base en los resultados obtenidos de RTI, MR y densidad, se buscó establecer una correlación entre los parámetros de RTI y MR, así como entre la densidad y el módulo resiliente. A continuación se describen los resultados obtenidos.

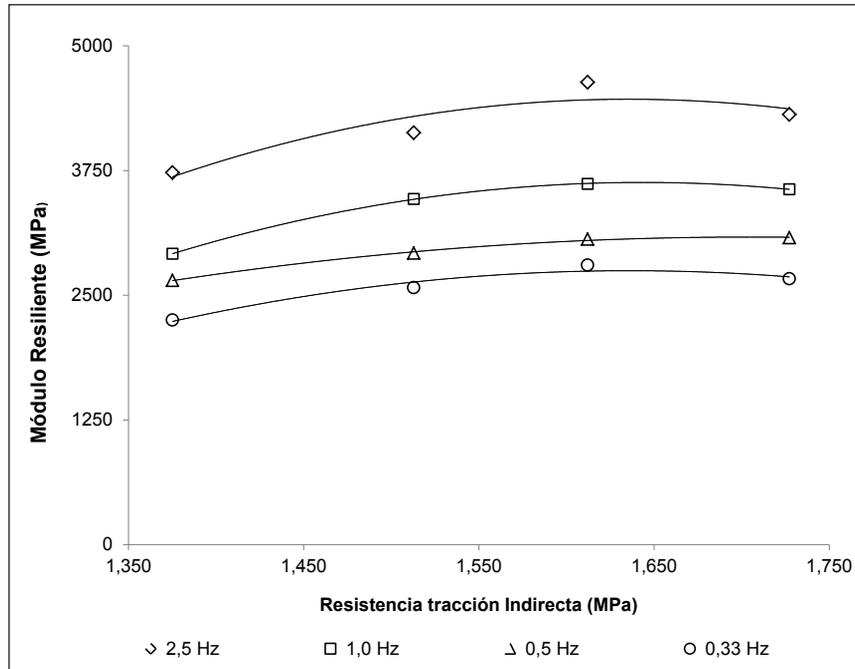


Figura 12. Correlación entre MR y RTI de las mezclas estudiadas.

Fuente: Elaboración propia a partir de la investigación

En la Figura 12, se observan las curvas existentes entre RTI y MR, donde se aprecia claramente que sin importar la frecuencia utilizada en el ensayo de MR, existe una correlación entre estos dos parámetros, la cual muestra que a mayor RTI, mayor MR. Así mismo, se evidencia que en la medida que aumenta la frecuencia del ensayo MR, el valor de módulo crece. De otra parte, se determina que para los mayores valores de RTI, el MR es relativamente similar, comportamiento que se puede explicar por los niveles de deformación que experimentan las probetas al ser ensayadas y por la resistencia máximas alcanzadas .

En la Figura 13, curvas de densidad versus módulo resiliente, se puede observar que los valores del módulo resiliente aumentan en la medida que crece la densidad, independiente de la frecuencia del ensayo.

Sin embargo, se evidencia en la correlación un comportamiento horizontal en las densidades mayores y su respectivo valor de MR.

Se podría plantear que dicho efecto se deba a los niveles de deformación que experimentan las probetas a altas densidades y cuya variable está directamente relacionada con el módulo resiliente.

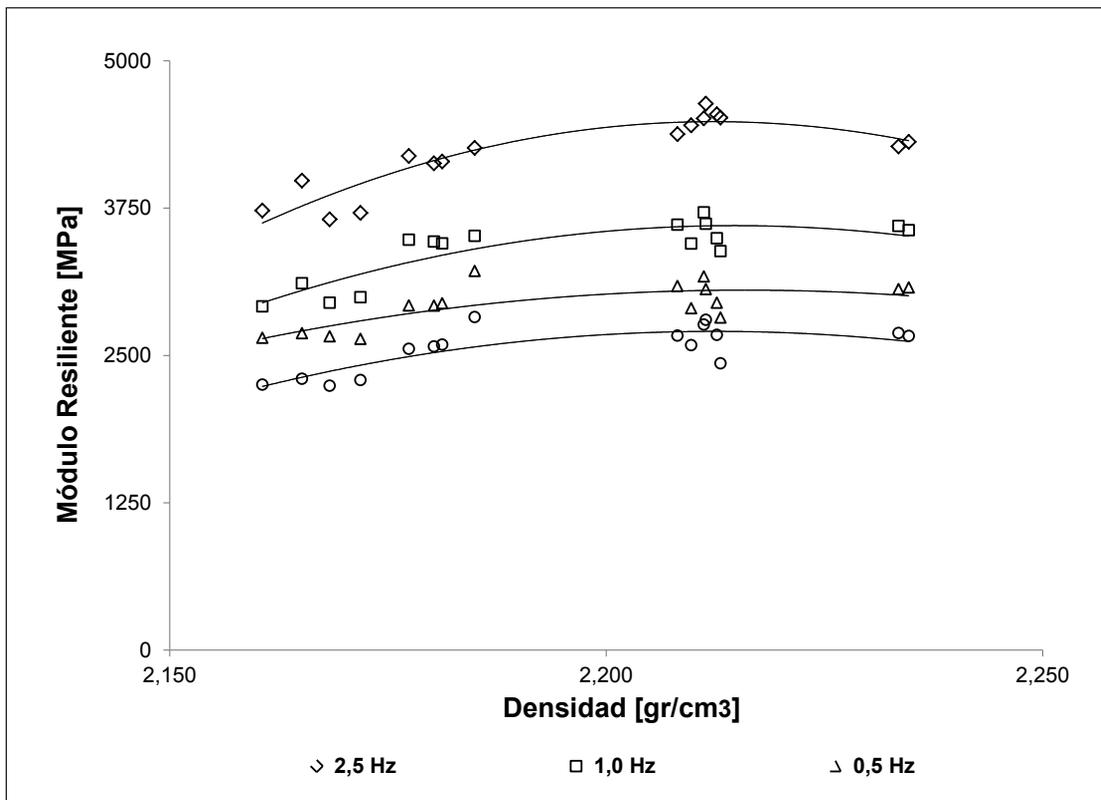


Figura 13. Correlación MR y densidad de las mezclas estudiadas.

Fuente: Elaboración propia a partir de la investigación

Conclusión

De los resultados de las petrografías y los parámetros de densidad, resistencia a la tracción indirecta y módulo resiliente de las mezclas fabricadas con diferentes granulometrías (md12 y md20) y agregados (canteras Cancun y Cantol), se puede concluir:

- Las mezclas asfálticas con granulometría md20 tienen mayor densidad que las md12, independiente del origen del material pétreo. Así mismo, al comparar las densidades de igual granulometría (md20 o md12), pero diferente origen del agregado, se estableció que las provenientes de la cantera del Tolima tienen mayor densidad.
- Existe una relación entre la resistencia a la tracción indirecta y el módulo resiliente de las mezclas asfálticas estudiadas, irrelevantemente de la frecuencia utilizada en

el ensayo. De igual forma, se evidencia que a mayor frecuencia, mayor es el valor de módulo resiliente. Así mismo, se observó que para las RTI mayores, el cambio en el Mr es poco.

- Con respecto a la densidad de las mezclas asfálticas investigadas, se pudo observar que en la medida que esta aumenta, el módulo resiliente también. Sin embargo, para los mayores valores de densidad, el Mr es relativamente constante, irrelevante de la frecuencia utilizada en el ensayo.
- Las probetas fabricadas con agregados de la cantera del Tolima (Cantol), son más susceptibles al agua que las provenientes de la cantera de Cundinamarca (Cancun), al presentar menores valores de resistencia conservada. Este fenómeno se da, irrelevantemente de la curva granulométrica estudiada. Se evidencia un comportamiento más favorable para las mezclas con granulometría md12.
- Los módulos resilientes de las probetas fabricadas con agregados provenientes de Cancun fueron considerablemente menores que los fabricados con Cantol, sin distinción del estado del ensayo (seco, húmedo o envejecido) y la frecuencia. Los valores más bajos se dieron para las mezclas md12.

Finalmente, se pudo establecer que existe una influencia significativa del comportamiento de una mezcla asfáltica en función del origen del agregado, del estado de la mezcla (seco, húmedo y envejecido) y que éstas, pueden afectar tanto el comportamiento mecánico como el dinámico. Por último, los resultados dan la posibilidad de correlacionar la densidad, RTI y Mr.

Bibliografía

1. Rodriguez, A. P. (2004). Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya
2. Alshamsi, K. S. (2006). *Development of a Mix Design Methodology for Asphalt Mixtures with Analytically formulated Aggregate Structures*. Louisiana.
3. Delgado et ál., P. G. (2006). Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. México D.F.: IMT.
4. IDU. (2005). Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público de Bogotá.
5. INVIAS. (2007). Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá.
6. Klein-Hurlbut. (2006). Manual de mineralogía. Barcelona: Reverte, S.A.
7. Maravi, Y. V. (2012). Propiedades y uso del asfalto. Lima: Universidad peruana los Andes.
8. Morea, F. (2011). Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas: Efecto de la reología de los asfaltos, la temperatura y las condiciones de carga. La plata, Buenos Aires.
9. Reyes, O. J. (2009). Cambios dinámicos y mecánicos de una mezcla asfáltica densa por las propiedades del asfalto y la energía de compactación. Ingeniería y desarrollo Universidad del Norte: Bogotá
10. Rodriguez, A. P. (2004). Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya.

11. Rubio, J. M. (2005). Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya.
12. Saleh, M. J. (2006). *Factors Affecting Resilient Modulus*. Quebec City, Canada: 10th International Conference on Asphalt Pavements (ICAP 2006).
13. Torres et ál., E. S. (2006). Aplicación del ensayo de tracción indirecta en mezclas asfálticas en caliente para el control de calidad de carpetas asfálticas en el Ecuador. Lima: Sangolquí.