

Mezclas Asfálticas

Evaluación de características físicas y químicas de los rellenos minerales de piedra caliza y polvo de piedra en la formulación de los morteros asfálticos

Breno Salgado Barra

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
brenobarra@gmail.com

Leto Momm

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
leto.momm@gmail.com

Fecha de recepción: 20 de noviembre del 2008

Fecha de aprobación: 06 de julio del 2009

Resumen

El objetivo de este trabajo es resaltar la importancia del estudio de los materiales denominados rellenos minerales, de diferentes orígenes minerales, empleados en la formulación de mezclas bituminosas, específicamente en los morteros. Después de varios enfoques en el medio científico, todavía se despierta la discusión entre los investigadores, sobre todo en los efectos físicos y químicos que los conciernen, los cuales influyen significativamente el desempeño mecánico de los morteros y consecuentemente de las mezclas asfálticas. La investigación fue realizada a partir de la utilización de rellenos minerales provenientes de rocas calcárea (polvo calcáreo) y granítica (polvo de piedra) de los depósitos del Estado de Pará, además con muestras de cemento asfáltico (CAP) 50/70 provenientes de la refinera Lubricantes y Derivados del Petróleo del Noreste (LUBNOR), localizada en Fortaleza (Ceará), donde se evaluaron aspectos como: análisis químico semi cuantitativo por fluorescencia de rayos X, granulometría por emisión de rayos láser de bajo ángulo, microscopía electrónica por barrido, captación de imagen de alta resolución, punto de reblandecimiento con anillo y bola, penetración y adhesividad en el asfalto-agregado y agregado-mortero. El conjunto de los resultados obtenidos, aún considerando el empirismo de los ensayos relacionados a los análisis de los morteros, indicaron tendencias convergentes, en el sentido de que la parte de actividad ejercida por un filler en la formación de un mortero es independiente de su finura, forma, textura, superficie específica y naturaleza, lo que subdivide el concepto de actividad en dos vertientes: física (rigidización) y química (adhesividad).

Palabras clave: adhesividad, relleno mineral, mortero asfáltico, rigidez.

Abstract

The objective of this project is to emphasize the importance of studying fill materials of different mineral origins, which are used in the formulation of bituminous mixtures, specifically of mastics. Even after several different approaches in scientific circles, this context is still under discussion among researchers, mainly regarding the physical and chemical effects involved, which have a great influence in the mechanical performance of the mastics, and consequently of the asphaltic mixtures. This research was developed from the use of mineral fill materials that come from lime rock (lime powder) and granite rock (rock powder) of the mineral deposits in the Pará state, as well as the samples of asphaltic cement (CAP) 50/70 that come from the refinery LUBNOR, located in Fortaleza (Ceará). Several aspects were evaluated, including: semi-quantitative chemical fluorescence x-ray analysis, low angle laser ray emission grading, scanning electron microscopy, high resolution image capture, ring and ball softening point, and aggregate-asphalt and aggregate-

mastic penetration and adhesivity. Even considering that the tests regarding mastic analysis were empirical, the results obtained on the whole indicated convergent trends. This means that the activity component exerted by a mineral fill material in the formation of a mastic subdivides the concept of activity in two aspects: physical (rigidity) and chemical (adhesivity), independent of its fineness, but dependent of its form, texture, specific surface and nature.

Palabras clave: adhesive, fill material, asphalt mastic, rigidity

Introducción

En general, materiales denominados rellenos minerales pueden ser definidos como aquellos que presentan partículas finamente divididas, provenientes de la trituración de rocas minerales, molienda de los agregados pequeños a través de procesos industrializados, dando como resultado el desarrollo de productos sintéticos, que se incorporan a los morteros y a las mezclas asfálticas a fin de mejorar su desempeño reológico, mecánico, térmico y de sensibilidad al agua. Su uso debe obedecer a los límites contenidos en especificaciones propias destinadas a la optimización del desempeño de sus funciones (Santana, 1995).

Los rellenos minerales se incluyen en las mezclas asfálticas, principalmente con la finalidad de generar mayor estabilidad y resistencia después de la compactación. Las teorías más extendidas con respecto a las causas que generan los efectos mencionados, citan la granulometría de las partículas como el factor principal (Al-Suhaibani et al, 1992).

Se atribuye a las pequeñas dimensiones de los granos, inferiores a 75 μm y superiores a 40 μm , la función de llenado de los vacíos formados por los granos mayores dentro del esqueleto mineral. Se le acredita a este factor el aumento de la densidad y la resistencia de la mezclas luego de la compactación (AASHTO, 2000).

En contraste, existe un grupo que presume que la disposición de las partículas más finas, inferiores a

37 μm (Radford, 1940) y especialmente las de 20 μm (Motta y Leite, 2000), y así mismo la totalidad de ellas (Ruiz, 1943), que están en suspensión en los betunes formando el mortero, absorbiendo parte de sus componentes, llevan a un aumento de la viscosidad y, consecuentemente la rigidez de las mezclas (Rao y Sen, 1973).

Y todavía hay quienes defienden que son ambas las funciones desempeñadas simultáneamente por estos materiales. Lo que los subdivide en denominaciones del relleno de los agregados, es que sean, inertes, y activos (Puzinauskas, 1969).

A pesar de un amplio aporte de los enfoques científicos sobre sus características, los rellenos todavía provocan polémica y puntos de discusión divergentes entre investigadores en el ámbito mundial, sobre cuáles son las causas que, de hecho, influyen en los efectos físicos y químicos que constituyen el componente activo de estos materiales cuando son utilizados en las mezclas asfálticas, específicamente en la composición de los morteros (Sebaaly et al, 2003; Santana, 1995; Anderson et al, 1992b).

Las mezclas bituminosas heredan las características de los ligantes que las contengan (De La Roche, 1996), por lo tanto, esta consideración se puede extender a los morteros. Por esta razón, este estudio tiene como objetivo verificar, en el ámbito de los ensayos realizados, cuáles serían los factores que actúan directamente sobre la modificación de las características originales del asfalto, es decir, su comportamiento físico y químico a partir de la adición de rellenos, comparando rellenos de dos orígenes mineralógicos diferentes, a saber: la piedra caliza (polvo calcáreo) y la roca de granito (polvo de piedra) provenientes de los depósitos del Estado de Pará.

Las muestras de cemento asfáltico (CAP) 50/70 suministrados por la refinería de Lubricantes y Derivados del Petróleo del Noreste (LUBNOR), con sede en Fortaleza (Ceará), también se utilizaron en la formulación de los morteros. El análisis compuesto por dos rellenos y dos morteros, toma aspectos tales como: análisis químico semi-cuantitativo por fluorescencia de rayos X, el tamaño de las partículas por láser de emisión de bajo ángulo, por microscopía electrónica de barrido, la captura de imágenes de alta resolución, punto de reblandecimiento con anillo y la bola, penetración y adhesividad en el mortero-agregado.

El tema propuesto en esta investigación despierta la importancia en la forma que la modificación de las características físicas y químicas del asfalto mediante la adición de dos rellenos, es decir, la formación de morteros, puede influir en el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas, tanto positiva como negativamente.

Origen geológico y mineral de los rellenos utilizados

Las características geológicas y minerales de los rellenos utilizados en la investigación, en resumen, son las siguientes:

Polvo de piedra

El polvo de piedra utilizado en este estudio pertenece a la Suite Intrusiva Tracuateua, integrado por las formaciones graníticas de Tracuateua (depósito de Santa Mónica), y Mirasselvas Tauari. Esta formación geológica aflora en el Cratón de São Luiz, ubicado en la Bahía de Parnaíba, que se describe en la carta geológica preparada por CPRM (2008), como: biotita-muscovita, sienogranitos asociados con diques sinplutónicos y apilamientos rara vez en color rosa, con granulometría de media a gruesa. Dataciones radiométricas realizadas por Almeida et al (1968) indican una edad aproximada de 1970 ± 60 millones de años, situando a esta formación en la Época Paleoproterozoica.

En el análisis químico semi-cuantitativo por fluorescencia de rayos X realizado en las muestras durante esta investigación, en el Laboratorio de Caracterización Tecnológica de la Universidad de São Paulo (LCT/USP), se obtuvieron los siguientes resultados: 35% de cuarzo, 33% de albita, 12% de zinwaldita, 18% de microclino, 2% de caolinita. Es importante detallar que el grupo de los feldspatos abarca a los minerales albita y microclino, mientras que el comportamiento de las micas lo da el mineral zinwaldita. Todos los minerales definidos en el análisis químico semi cuantitativo, son ricos en silicio y, por lo tanto, reciben la denominación de minerales félsicos o ácidos, además de electronegativos.

Para la definición del nombre de la roca se utilizó la clasificación propuesta por la Unión Internacional de las Ciencias Geológicas (IUGS), que se convirtió en el método más utilizado en todo el mundo, principalmente para las rocas compuestas de minerales félsicos (Streckeisen, 1976). En esta clasificación, la muestra analizada se considera un monzogranito; sin embargo, está muy cerca de la clase de los sienogranitos. Klein y

Moura (2003) definen el conjunto intrusivo Tracueteua no sólo como compuesta apenas por sienogranito, como se define en la carta geológica preparada por la CRPM (2008), sino también por monzogranitos con dos micas originadas por la formación de la corteza Paleoproterozóica más antigua y de la corteza Arqueana.

Del análisis macroscópico de las muestras de mano, este monzogranito se presenta como una roca ácida maciza con granulación media, pudiéndose observar que algunos fragmentos de piedra ya están desgastados, con minerales opacos y rompiéndose con la aplicación de esfuerzo manual. La presencia de caolinita es indicativo de la alteración química de los feldespatos en esta roca.

Polvo de piedra caliza

En el caso del polvo calcáreo, se ha utilizado desde los años 60 en la fabricación de cemento Portland por la empresa Cementos de Brasil S.A. (CIBRASA), siendo la principal actividad minera del Noreste del Estado de Pará. Localizada en la Bahía de Parnaíba, esta roca pertenece a la formación Pirabas, inmediatamente debajo de la formación Barreiras. La formación Pirabas es un depósito del Período Terciario (65 a 1,7 millones de años), compuesto por fósiles calcáreos, que contiene algunas veces, esquistos (roca formada de minerales arcillosos) y margas (roca compuesta de minerales con carbonato y con 35% a 60% de arcilla). Sus afloramientos se producen sólo en los valles, en cortes de las carreteras y delante de los labrantíos (CPRM, 2008).

Para la cuantificación de los minerales presentes en la roca matriz, también fue hecho un análisis químico semi-cuantitativo por fluorescencia de rayos X en el Laboratorio de Caracterización de Tecnología de la Universidad de São Paulo (LCT/USP), llegando al siguiente resultado: 90% de calcita, 6% de dolomita y 4% de cuarzo.

La calcita es uno de los minerales más comunes, compuesta por Carbonato de Calcio (CaCO_3), generalmente de color blanco o incoloro, gris, rojo, verde, azul y amarillo. La dolomita es un carbonato doble de Calcio y Magnesio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) que muestra como propiedades de diagnóstico cristales en forma de rombo, pueden presentarse en colores rosa, blanco, gris, verde, marrón y negro (DPM/UNESP, 2008). Por tanto, la calcita es un mineral compuesto de una carga

eléctrica predominantemente positiva, que abarca casi toda la composición del polvo calcáreo, por esta razón se tiene que este relleno posee características eletropositivas.

Por presentar en su composición más del 50% de carbonatos minerales, la muestra estudiada es originaria de una roca de carbonos. Para la clasificación de esta roca de carbono se optó por el criterio composicional y que toma en cuenta la cantidad de minerales que lo constituyen. Se utiliza un diagrama triangular, en el que las rocas de carbono se dividen en ocho grupos. Por presentar una relación dolomita/calcita menor de 1/9 y contener menos del 10% de impurezas (minerales no carbonatados, que en este caso corresponde a un 4% de cuarzo), la roca se clasifica en un diagrama triangular, como una piedra caliza (DPM/UNESP, 2008).

Consideraciones sobre los aspectos físicos y químicos que rigen el comportamiento de los rellenos

Algunos enfoques relacionados con los rellenos tienen décadas de vigencia y discusión en el medio científico, sin embargo, rodeados de desacuerdos en cuanto a la solidez en sus puntos de vista y bases técnicas, lo que permite inferir que el comportamiento de estos materiales todavía es poco conocido o incomprendido en gran parte por los profesionales en el área de pavimentos (Santana, 1995, Anderson et al, 1992a; Anderson et al, 1992b).

Por lo tanto, la función de material inerte en la composición de las curvas granulométricas, considerando apenas el relleno de los vacíos formados por partículas más grandes, no se analizará en este trabajo, debido a sus pequeñas dimensiones, inferiores a 75 μm , los rellenos lo desempeñan naturalmente.

En cuanto a los aspectos físicos del relleno, las diferencias usuales son verificadas sobre cuál característica predomina en la alteración de las características de los asfaltos, si la finura o la forma de las partículas, por ejemplo. Como puede ser observado en la introducción de este trabajo, las partículas finas para Motta y Leite (2000), Radford (1940) y Rao, y Sen (1973), es preponderante en la formación de los morteros en cuanto a la alteración de la viscosidad de los asfaltos, actuando como agente rigidificador.

Al-Suhaibani et al (1992) al estudiar el efecto del tipo de relleno en morteros con la evaluación de los resultados de la prueba del punto de reblandecimiento anillo y bola,

llegaron a la conclusión de que el uso de polvo calcáreo y cal hidratada, representa una mayor rigidez, en relación con el cemento Portland, incluso cuando se mezcla con algunos porcentajes de ambos materiales, siendo esta tendencia más evidente a medida que se aumentan las cantidades de relleno en las dosificaciones de los morteros, que ejemplifica el comportamiento activo de los primeros e inerte del segundo.

Sin embargo, del análisis de los resultados de la investigación citada en el párrafo anterior, es fácil comprender el motivo de tantas preguntas en el medio científico sobre cuáles características del relleno contribuyen, de hecho, en la alteración del estado natural de los asfaltos, pues simplemente justificar los mejores desempeños de rigidización de los morteros por el uso de polvo calcáreo y de cal hidratada, en relación con el cemento Portland, sin mayor aclaración al respecto, sugiere varias maneras de interpretar los resultados: si bien se reconoce que los materiales electropositivos tienen mayor afinidad adhesiva con los asfaltos, por tanto, una característica química, también hay un aspecto físico de los efectos sobre el aumento de la rigidez de estos materiales relacionados con el aumento de su cantidad (volumen) en la dosis de los morteros, que fácilmente podría estar relacionado con el tamaño de la granulometría de las partículas (finura) o con el incremento de una reacción química en cadena, o además con la concentración volumétrica relacionada con la forma de las partículas.

En contraste, Anderson et al (1992b), después de haber estudiado los efectos de las fracciones de menos de 75 μm de polvo calcáreo y polvo de piedra triturada, en el comportamiento mecánico de los morteros asfálticos, a partir de la evaluación de la resistencia a la fractura cuando son sometidos a esfuerzos dinámicos de cizallamiento con el uso de reómetro, concluyeron que la graduación no está necesariamente relacionada con la rigidización del asfalto, ya que las partículas más finas habían tenido un comportamiento muy parecido a las partículas gruesas. Este hallazgo es consistente con los estudios realizados anteriormente por Ruiz (1943), que afirma de ser una actividad ejercida por un relleno en la formación de un mortero independiente de su finura, más que de su forma y naturaleza, siendo esta última característica vinculada a aspectos químicos de la adhesión.

El requisito de superficie específica del relleno, que es el área ocupada por unidad de masa de un determinado material y, que en las mezclas asfálticas hace parecer

mayores contenidos de asfalto, también es un concepto que genera debate sobre cuál es su papel en la modificación de las características originales del asfalto, si física o química.

Légare y Chapuis (1992) después de desarrollar un método propio de cálculo de esta variable, en comparación con los resultados de otros cinco métodos existentes, a partir del análisis de cinco diferentes tipos de rellenos (polvo de piedra caliza, cal hidratada, dolomita, basalto y esferas de vidrio), teniendo en cuenta sólo los aspectos físicos tales como porcentajes de la distribución de los materiales en las curvas granulométricas y densidad aparente de cada una de ellas, con base en los estudios previos sobre el área superficial de los rellenos de Arrambide y Duriez (1962), se llegó a la conclusión de, cuanto mayor es la superficie específica del material aumenta su carácter activo en la modificación de las características de los asfaltos.

Cheng et al (2003) presenta un punto de vista dual y distinto al del párrafo anterior para el tema de la superficie específica de los rellenos al estudiar la Teoría de Energía Libre por unidad de masa de Gibbs para la evaluación de la adherencia entre el conjunto de agregado asfalto, pues considera que el área de la superficie específica por unidad de masa de un material también refleja el efecto de textura superficial de las partículas, y que la energía libre presente en las uniones químicas de los dos materiales es el factor necesario para que haya una separación de la película del asfalto de la partícula del agregado.

En cuanto a los componentes químicos que actúan de forma activa en los rellenos y en los morteros, son varios los enfoques que lo hacen interesante y que profundizan el debate sobre el tema. Comenzando por la definición del propio concepto de la actividad, que en una visión amplia, se atribuye a una parte de las fracciones de los rellenos, la función de modificar (activar) las propiedades de los asfaltos (Puzinauskas, 1969). Pero, Ruiz (1943) ya definió esta actividad a través de la teoría de un mortero bien dosificado, utilizando el principio de la Concentración Volumétrica (C), considerando que los rellenos estando totalmente en suspensión en los asfaltos, presentan la propiedad de aumentar su viscosidad, en el caso de la investigación mencionada sería la disminución de la penetración, activándolos a partir del aumento del espesor, o sea, aglutinándolos.

Posteriormente, se incorporaron los conceptos de Energía Superficial Termodinámica con el fin de

comprender mejor el fenómeno de la alteración de las características de los asfaltos por la presencia de rellenos. Por tanto, ha desarrollado la Teoría de la Energía Superficial, que importó las Teorías de la Química Clásica y examina los dos componentes que actúan en el proceso de interacción molecular, a saber: las fuerzas de Lifshitz-Van der Waals y la interacción ácido-base de Lewis (SI et al, 2002).

La primera se compone de tres sub-componentes: las fuerzas de dispersión de London, que regula la atracción entre las partículas electrónicas adyacentes, produciendo una interacción de inducción dipolo-dipolo, la fuerza de inducción de Debye, la cual es producida por un dipolo induciendo a otro dipolo que está acoplado a una molécula adyacente, y; la fuerza de orientación de Keesom, siendo la interacción de dos dipolos que se orientan voluntariamente unos a otros. La segunda regula la interacción directa entre los elementos de características ácidas y básicas presentes en una partícula en un conjunto integrado, tal como el binomio relleno-asfalto y el mortero-agregado, pudiendo tener su relación de predominancia (ácida o básica) aumentada o disminuida en función de la proporción representativa de cada elemento representativo que constituye el material o el conjunto, y es expresada por la Ecuación 1 (Cheng et al, 2003; SI et al, 2002).

$$\Gamma^{AB} = \sqrt{\Gamma^+ + \Gamma^-}$$

Ecuación 1

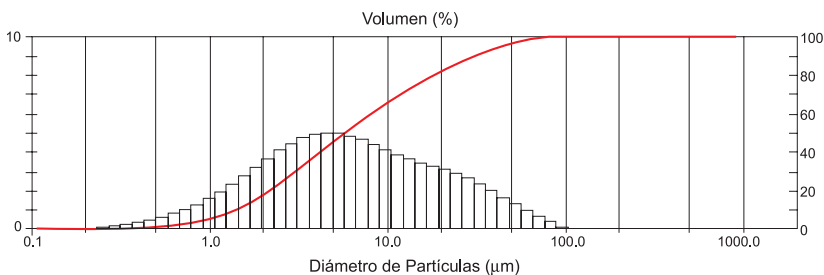
Donde:

Γ^{AB} = relación de interacción ácido-base de Lewis;

Γ^+ = componente ácido de Lewis;

Γ^- = componente básico de Lewis.

Figura 1 Distribución granulométrica del relleno polvo calcáreo



Fuente: Los autores

Las partículas de los rellenos poseen iones negativos y positivos, las interacciones ácido-base incluyen todos los tipos de uniones electrónicas de donación

(recepción de protones) y recepción (donación de protones) de electrones, inclusive las uniones o Puentes de Hidrógeno (Cheng et al, 2003).

Sumando, ambos componentes (fuerzas de Lifshitz-Van der Waals y la interacción ácido-base de Lewis) pueden ser utilizadas para explicar las interacciones moleculares pertinentes a las uniones adhesivas, que ocurren en la interface agregado-asfalto, y cohesivas, presentes en los morteros que componen las mezclas asfálticas (SI et al, 2002).

Otro concepto también utilizado en las investigaciones que incluyen las interacciones moleculares entre dos cuerpos, como la unión relleno-asfalto, es el de la absorción, definida como la adhesión de las moléculas de un fluido (o absorbido) a una superficie sólida (o absorbente). en que el grado de absorción depende de la temperatura, de la presión y del área de superficie de contacto. Poseen dos caracteres: químico (absorción química), en que las moléculas (ó átomos) se unen a la superficie del absorbente a través de la formación de uniones químicas (generalmente covalentes) y tienden a acomodarse en sitios que propicien el mayor número de coordinación posible con el sustrato; y física (absorción física), en que las moléculas del absorbente y del adsorbido se integran por interacciones de Van der Waals, que a pesar de ser interacciones de largo alcance, son débiles y no forman uniones químicas. Los sólidos porosos son absorbentes óptimos, además, los rellenos que presentan porosidad elevada poseerán capacidad de absorber mayor cantidad de asfalto, factor que teóricamente generaría un anclaje más fuerte entre las partículas y consecuentemente, un aumento de la rigidez (Wikipedia, 2008).

Son estos componentes químicos descritos, en concordancia con la naturaleza mineralógica de los materiales (observadas en el tópic anterior en los análisis químicos semi-cuantitativos por fluorescencia de rayos X), que permiten definirlos en electronegativos y electropositivos, siendo los primeros más vulnerables a la falta de adhesión y la desagregación del conjunto granular-bitumen, en relación al segundo (Sebaaly et al, 2003; SI et al, 2002; Kim et al, 1992; Al-Suhaibani et al, 1992).

Ensayos realizados

Los ensayos realizados en esta investigación, considerando el alcance de las informaciones que pueden ser obtenidas con los resultados, sirven para

contribuir en la identificación de cuáles características de los rellenos influyen en la alteración de las características originales de los asfaltos por la ocasión de la formación de los morteros, que se reflejan consecuentemente en el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas.

Granulometría láser

Con la finalidad de verificar con mayor precisión la distribución granulométrica de los rellenos polvo calcáreo y polvo de piedra que fueron utilizados en la composición de los morteros, se realizaron, ensayos de granulometría por emisión de rayos láser de bajo ángulo en el Laboratorio de Caracterización Tecnológica de la Universidad de São Paulo (LCT/USP), conforme se ilustra en las Figuras 1 y 2.

A partir de los histogramas estadísticos presentados, se puede observar que los porcentajes de partículas inferiores a 37 μm y 20 μm (indicados por la trayectoria de línea sinuosa, en relación con la escala correspondiente al lado derecho del eje de las ordenadas en los gráficos) fueron de 94,82% y 84,81% para el polvo calcáreo, y de 43,77% y 22,87% para el polvo de piedra, respectivamente, que están en concordancia con los resultados referentes a las superficies específicas de estos materiales, donde el polvo calcáreo fue mayor (0,7225 m^2/g) que el polvo de piedra (0,1311 m^2/g).

Microscopía electrónica por exploración

La verificación de la forma y de la textura de las partículas del relleno de polvo calcáreo fue estudiada a partir del análisis de imágenes producidas por microscopía electrónica por barrido (MEV) (Figura 3a y 3b), ejecutada en el Laboratorio de Caracterización de Micropartículas de la Universidad Federal de Santa Catarina (LCM/UFSC).

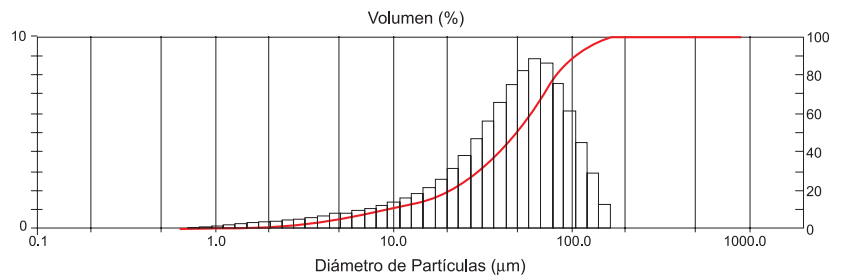
De acuerdo con las imágenes, es posible notar la forma no esférica de los granos, circundados por aristas vivas, con textura superficial rugosa y puntos localizados de elevada porosidad. Estas características que actúan en conjunto contribuyen por un buen anclaje del relleno y el asfalto, alternado la viscosidad de este último.

Captura de imagen de alta resolución

Debido a la indisponibilidad del microscopio electrónico de barrido en la época de los ensayos con las muestras del relleno de polvo de piedra, se hizo la captura de

Distribución granulométrica del relleno de polvo de piedra

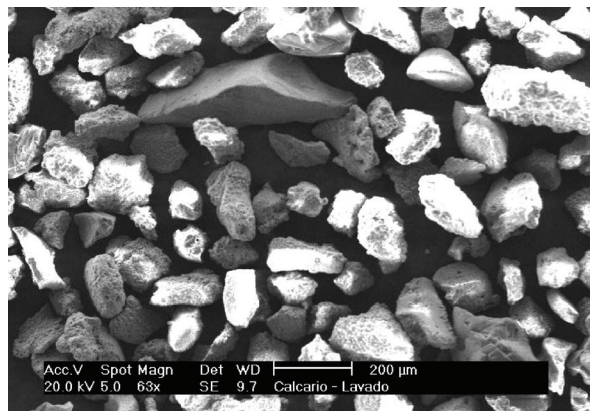
Figura 2



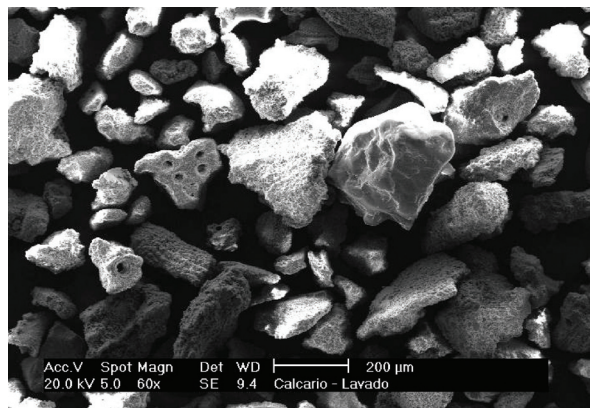
Fuente: Los autores

Imagen microscópica de los granos de polvo calcáreo ampliados en 63 (a) y 60 (b) veces.

Figura 3



(a)



(b)

Fuente: Los autores

las partículas a través de la imagen de alta resolución, en el Laboratorio de Tecnología en Pavimentación de la Universidad de São Paulo (LTP/USP) (Figura 4).

Por la imagen capturada, las mismas características en cuanto a forma y textura descritas para el polvo calcáreo fueron observadas, también para el polvo de piedra.

Figura 4 Captura de imagen de alta resolución de los granos de polvo de piedra



Fuente: Los autores

Tabla 1 Punto de ablandamiento anillo y bola de las muestras de asfalto puro

CAP 50 / 70 Puro	°C
Primera determinación	49.0
Segunda determinación	50.0
Promedio	49.5

Fuente: Los autores

Tabla 2 Punto de ablandamiento anillo y bola de las muestras de asfalto con una adición de 6% de polvo de piedra, ensayadas el mismo día del moldeo de los morteros

CAP 50 / 70 (con 6% de polvo de piedra)	°C
Primera determinación	51.0
Segunda determinación	52.0
Tercera determinación	53.0
Cuarta determinación	53.0
Quinta determinación	50.0
Sexta determinación	51.0
Séptima determinación	52.0
Octava determinación	52.5
Novena determinación	53.0
Décima determinación	53.5
Promedio	52.1

Fuente: Los autores

Punto de ablandamiento de anillo y bola

Los ensayos de punto de reblandecimiento de anillo y bola (ABNT NBR 6560, 2005) fueron ejecutados a partir de la formulación de los morteros adicionados con relleno de polvo calcáreo y de polvo de piedra, ambos con 6% por peso del asfalto, con el fin de verificar a partir de las cantidades iguales presentes en la dosificación,

realizar comparación más precisa de los efectos de cada material.

La rutina de los ensayos comprendió tres diferentes etapas: análisis del asfalto puro, después con una adición de 6% del relleno con el ensayo habiendo sido realizado después de moldeados los morteros, y con la adición del 6% de relleno, pero, con la realización del ensayo luego de cinco días de reposo de las muestras, con el objetivo de verificar si durante este período de cura de los morteros, alguna reacción química entre los dos componentes sería desencadenada al punto de contribuir notoriamente en la alteración de las características originales del asfalto.

Para convertir la dispersión de los resultados lo menor posible, visto que este tipo de ensayo es eminentemente empírico, durante cada grupo de pruebas, las muestras fueron de una misma dosis y la graduación de la altura de la llama de la estufa fue mantenida constante, sin interrupciones entre el intercambio tanto de las muestras como del agua del recipiente, pretendiendo que la variación de la temperatura del agua se mantuviera en 0,5°C por minuto cuando las muestras estaban inmersas. Vale resaltar que cada determinación de los resultados descritos en las Tablas 1 a 5 corresponde a un par de muestras ensayadas simultáneamente.

Analizando los resultados obtenidos con las muestras de asfalto puro, es importante resaltar que de acuerdo con la norma ABNT NBR 6560 (2005), el CAP 50/70 utilizado en la investigación está dentro de las especificaciones, pues para este tipo de asfalto está especificado un valor mínimo de punto de reblandecimiento de 46 °C, y la muestra sometida a prueba presentó un resultado de 49.5 °C, o sea, 3.5 °C por arriba del límite mínimo especificado.

Con relación a las muestras de asfalto con la adición del 6% de relleno ensayadas en el mismo día de moldeo de los morteros, se pudo verificar dos aspectos que perjudican en el momento de un análisis más exacto: el empirismo del ensayo y el comportamiento viscoelástico de los morteros, pues son factores que contribuyen con la dispersión de los resultados. Con todo, en estos casos, las interpretaciones deben seguir un enfoque de tendencias del comportamiento y no de la evaluación puntual de los datos.

Con respecto al aspecto de las tendencias del comportamiento, es posible observar dentro de la variabilidad de los resultados, situación normal frente a

la viscoelasticidad de asfalto, la influencia de la adición de ambos tipos de rellenos probados en el aumento de los valores de los puntos de ablandamiento de asfalto, con relación a su estado natural, en que analizando la media de los resultados, hubo un aumento de 2.6 °C y 2.3 °C para los morteros con polvo de piedra y para los de polvo calcáreo, respectivamente, con picos de 4 °C para el primero y de 3.5 °C para el segundo.

Partiendo de los resultados de las muestras ensayadas luego de cinco días de moldeado los morteros, se notó un estancamiento mayor de los valores obtenidos, lo que sugiere hacer un período de reposo recomendado, también denominado de cura, para que halla un acomodo adecuado da las partículas de los rellenos en suspensión en los asfaltos, garantizando una mayor estabilidad en el comportamiento de los morteros. Pero, las magnitudes de los valores no sufre alteraciones significativas, pues estuvieron muy próximas y, a veces, iguales a los valores pico alcanzados para las muestras ensayadas en el mismo día del moldeo de los morteros.

Al plantearse estos resultados se puede inferir las siguientes conclusiones: debido a la característica iónica del polvo de piedra al ser antagónica al del polvo calcáreo, y habiendo sido mencionado anteriormente que los materiales electronegativos (como el polvo de piedra) poseen una actividad química inferior a la de los materiales eletropositivos (caso del polvo calcáreo), era de esperarse que si el aspecto químico prevalece en la rigidización de los morteros, aquellos con adición de polvo calcáreo se habrían obtenido resultados elevados en relación a los compuestos con la adición del polvo de piedra, lo que no fue verificado, ni tampoco para el período de cinco días de cura.

Otro factor que, al contrario de algunos enfoques de investigaciones citadas anteriormente, no mostró contribuir en nada a la rigidización de los morteros, fue la cantidad de partículas inferiores a 37 µm ó 20 µm de los rellenos, así mismo con porcentajes extremadamente dispares en este rango de dimensiones (Figuras 1 y 2), tanto el polvo de piedra así como el polvo calcáreo, presentan comportamientos muy semejantes.

La superficie específica tampoco se mostró influyente en cuanto a la actividad de los rellenos en la modificación de las características físicas originales del asfalto, específicamente la viscosidad, pues no fue observado una mayor rigidización con el relleno que presentó más superficie específica, o sea, el polvo calcáreo, como era

Punto de ablandamiento anillo y bola de las muestras de asfalto con una adición de 6% de polvo calcáreo, ensayadas el mismo día del moldeo de los morteros

Tabla 3

CAP 50 / 70 (con 6% de polvo calcáreo)	°C
Primera determinación	51.0
Segunda determinación	51.0
Tercera determinación	52.0
Cuarta determinación	53.0
Quinta determinación	50.0
Sexta determinación	51.0
Sétima determinación	52.0
Octava determinación	53.0
Novena determinación	52.0
Décima determinación	53.0
Promedio	51.8

Fuente: Los autores

Punto de ablandamiento anillo y bola de las muestras de asfalto con una adición de 6% de polvo de piedra, ensayadas luego de cinco días del moldeo de los morteros

Tabla 4

CAP 50 / 70 (con 6% de polvo de piedra)	°C
Primera determinación	53.0
Segunda determinación	53.0
Promedio	53.0

Fuente: Los autores

Punto de ablandamiento anillo y bola de las muestras de asfalto con una adición de 6% de polvo calcáreo, ensayadas luego de cinco días del moldeo de los morteros

Tabla 5

CAP 50 / 70 (con 6% de polvo calcáreo)	°C
Primera determinación	54.0
Segunda determinación	54.0
Promedio	54.0

Fuente: Los autores

de esperar.

La tendencia de igualdad en la rigidización del asfalto en ambos rellenos parece estar ligada a la forma (sub-angular y con aristas vivas) y a la textura (rugosa) de las partículas, las cuales se muestran semejantes luego de los análisis de las imágenes de microscopía electrónica por barrido de las imágenes captadas de alta resolución, pues son características que propician un mejor anclaje entre el asfalto y la partícula, y que se estabiliza luego de cierto período de cura, garantizando mayor adherencia cuando se comparan a los agregados con partículas redondeadas, tornándose las matrices de los morteros más rígidas.

Tabla 6 Penetración de las muestras de asfalto original

CAP 50 / 70 Puro	Penetración (0.1 mm)
1ª Lectura	49.0
2ª Lectura	50.0
3ª Lectura	49.0
4ª Lectura	51.0
5ª Lectura	52.0
Promedio	50.2

Fuente: Los autores

Tabla 7 Penetración de las muestras de asfalto con adición de 6% de polvo de piedra

CAP 50 / 70 (con 6% de polvo de piedra)	Penetración (0.1 mm)
1ª Lectura	33.0
2ª Lectura	35.0
3ª Lectura	35.0
4ª Lectura	35.0
5ª Lectura	33.0
Promedio	34.2

Fuente: Los autores

Tabla 8 Penetración de las muestras de asfalto con adición de 6% de polvo calcáreo

CAP 50 / 70 (con 6% de polvo calcáreo)	Penetración (0.1 mm)
1ª Lectura	33.0
2ª Lectura	35.0
3ª Lectura	35.0
4ª Lectura	33.0
5ª Lectura	33.0
Promedio	33.8

Fuente: Los autores

Penetración

La ejecución de los ensayos de penetración (ABNT NBR 6576, 2005) siguió el mismo procedimiento de dosificación de los morteros para los ensayos de punto de ablandamiento anillo y bola, pero, se siguieron dos etapas: pruebas con muestras de asfalto original y posteriormente con morteros adicionados igualmente al 6% de relleno de polvo de piedra y de polvo calcáreo. Los resultados se resumen en las Tablas 6 a 8.

Observando los resultados de los ensayos realizados con las muestras de asfalto original, se verificó que la muestra de CAP 50/70 también está dentro de las especificaciones de la norma ABNT NBR 6576 (2005),

que especifica una penetración mínima de 50 (0.1 mm) para este tipo de asfalto, en que el resultado de la media obtenida fue de 0.2 (0,1 mm), con picos de 52 (0.1 mm).

Así como en los ensayos de punto de ablandamiento con anillo y bola, las muestras de los ensayos de penetración presentan dispersiones en los resultados, debido al comportamiento viscoelástico del asfalto. Con todo, las muestras adicionadas al 6% de relleno, a pesar de la reducción esperada de la penetración en la formación del mortero, se mantuvieron en la misma tendencia de comportamiento, en que los resultados prácticamente fueron idénticos, y, se refuerzan todas las observaciones hechas con el análisis de los ensayos de punto de ablandamiento con anillo y bola.

Adhesividad

Para verificar el efecto de la adhesión que los rellenos son capaces de promover al conjunto agregado-mortero, fueron utilizados los principios normativos DNER-ME 78/94 (1994), en que los ensayos fueron conducidos en dos etapas: evaluación de la adhesividad agregado-asfalto (en estado original), y posteriormente agregado-mortero (adicionados igualmente al 6% de relleno de polvo de piedra y de polvo calcáreo). El agregado utilizado fue piedra granítica proveniente del depósito Santa Mónica, localizado en el Municipio de Tracuateua, en la región Noreste del Estado de Pará, mencionada en el tópico titulado materiales utilizados. Los resultados pueden ser observados en la Figura 5 (a, b).

Observando la Figura 5 es fácil percibir cuanto la naturaleza mineralógica de los rellenos es importante en el aspecto de la adhesividad del conjunto agregado-asfalto y agregado-mortero, apenas esclareciendo que para efecto de no replicar las figuras, la ilustración de la letra (a), conforme se describe en la leyenda, exhibe el resultado de dos situaciones ensayadas, donde el comportamiento adhesivo fue el mismo para el conjunto agregado-asfalto (puro) y agregado-mortero (con 6% de polvo de piedra), o sea, separación casi completa de la película de asfalto de los agregados, mientras que para el conjunto agregado-mortero (con 6% de polvo calcáreo), a pesar de es posible verificar algunos puntos localizados de separación de la película de asfalto, se observa una adhesión bien eficiente del conjunto.

Esto se explica debido a que los rellenos provenientes de rocas de características eletropositivas (como la Calcita), es decir, de características básicas, absorben

a través de absorción química las moléculas de los asfaltos, que durante ese proceso reaccionan con los ácidos nafténicos, formando una interacción ácido-base de Lewis que resulta en la formación de Naftanato de Calcio, o sea, un compuesto insoluble en agua (Santana, 1992), formando un “blindaje” de la película del ligante que recubre el agregado. Entretanto, el polvo de piedra, al ser también de característica ácida, así como el asfalto, no alcanza el mismo éxito del polvo calcáreo.

Por lo tanto, la adhesividad cohesiva e interfase de los conjuntos relleno-asfalto y el agregado-mortero, respectivamente, al contrario de lo que acontece en la absorción física (fisisorción), correspondiente a las fuerzas de atracción de Lifshitz-Van der Waals, en que las fuerzas de atracción moleculares son de largo alcance, pero no forman uniones químicas, está ligada a la absorción química (absorción química) del asfalto por el relleno, que está directamente relacionada con las interacciones ácido-base de Lewis, en función del contacto entre los elementos de los conjuntos, desarrollarse uniones químicas semejantes a las que ocurren en las uniones iónicas, las cuales son muy fuertes, inclusive con la formación de nuevos compuestos (caso de Naftanato de Calcio, por ejemplo). Entretanto, lo que determina una buena o mal adhesión entre el relleno y asfalto en este caso, es su naturaleza eléctrica, y por eso, el polvo calcáreo es más eficiente que el polvo de piedra.

A partir de las explicaciones del párrafo anterior, se puede verificar la importancia de la distinción de los conceptos de atracción molecular y unión química, en la cual la primera refleja apenas una aproximación entre elementos y, la segunda, la interacción de las cargas eléctricas de los elementos en la formación de nuevos compuestos.

La interacción ácido-base de Lewis es responsable también por la mejora en la resistencia a las microfisuras de fatiga, debido a que proporciona velocidades de evolución del daño más bajas y elevada capacidad de acumulación de estos, donde los rellenos sean empleados en cantidades óptimas, sin convertirlo en comportamiento de los morteros quebradizos (Kim et al, 2003), además de una autoreparación de larga duración luego de la ruptura, ya sea de los morteros o de las mezclas asfálticas, ocurriendo exáctamente lo inverso con los rellenos de característica electronegativa, como el polvo de piedra (SI et al, 2002).

Aspecto de la adhesividad de los conjuntos agregado-asfalto y agregado-mortero: (a) con el asfalto en estado original con una adición de 6% de polvo de piedra y (b) una adición de 6% de polvo calcáreo

Figura 5



(a)



(b)

Fuente: Los autores

En cuanto a la superficie específica, se no se presentó correlación en la alteración de las características físicas del asfalto, lo mismo no se puede decir en cuanto al aspecto químico de la actividad de los asfaltos, pues hubo una mejora visible en la adhesividad del conjunto agregado-mortero, que poseía el relleno con mayor área ocupada por unidad de masa, en el caso del polvo calcáreo ($0,7225 \text{ m}^2/\text{g}$), en relación con el polvo de piedra ($0,1311 \text{ m}^2/\text{g}$), estando em concordancia con la definición de Wikipedia (2008) descrita anteriormente. Esto ocurre debido a que el aumento de la superficie

específica contribuye a la potencialización del trabajo de absorción química del asfalto por el relleno, en función del aumento del área de contacto interfase entre las superficies del conjunto, generando una ampliación del campo eléctrico de interacción molecular más favorable a la adhesión agregado-asfalto, en concordancia con la ionicidad tomada como adecuada de las partículas de relleno, o sea, electropositiva.

Conclusiones

Con base en las interpretaciones de los resultados de los ensayos realizados, se tiene que el concepto de la actividad de los rellenos en los conjuntos relleno-asfalto y el agregado-mortero constituye una integración simultánea de dos características: física e química.

La parte física se mostró regida principalmente por las condiciones de la forma y textura de las partículas, que garantizan un anclaje firme de la película de asfalto sobre la superficie de los granos, formando morteros con matrices más rígidas, en relación con el asfalto en estado original, garantizando la alteración de la viscosidad, como se puede observar en los resultados de los ensayos de punto de ablandamiento de anillo y bola y de penetración. La porosidad, a pesar de ser una característica física que también contribuye en la mejoría del anclaje del asfalto a los rellenos, mejorando la rigidización, no se pudo estudiar detalladamente con base en los ensayos realizados.

En cuanto a la parte química, la superficie específica en conjunto con la naturaleza mineralógica, o sea, eléctrica, de las partículas de los rellenos fueron las características determinantes, haciendo viable el aumento del campo eléctrico de atracción molecular y en la formación de las uniones iónicas referentes a las interacciones ácido-base de Lewis, respectivamente.

Con respecto a la parte física, ambos rellenos estudiados (polvo calcáreo y polvo de piedra) presentaron un comportamiento prácticamente idéntico, sin diferencias significativas en la contribución de cada uno sobre la alteración de la viscosidad del asfalto. Entretanto, en la parte química, las diferencias fueron visibles, pues fue mejor el desempeño adhesivo del conjunto agregado-mortero que recibió la adición del relleno de mayor área ocupada por unidad de masa y dotado de carga eléctrica positiva (catiónica), en el caso del polvo calcáreo, teniendo el polvo de piedra un desempeño insatisfactorio debido a que posee las características contrarias anteriormente mencionadas.

Por lo tanto, como Ruiz (1943) ya lo afirmó, los resultados de esta investigación apuntan en la misma dirección sobre el hecho de que la actividad de un relleno en el conjunto relleno-asfalto y agregado-mortero está directamente relacionada con la forma y la naturaleza de las partículas, pudiendo ser añadidas todavía las características citadas tanto la textura como la superficie específica, y no su finura.

Bibliografía

1. AASHTO (2000), Hot-Mix Asphalt Paving Handbook. American Association of State Highway Transportation Officials. United States National Research Council (U.S.); 219 p.; ISBN-10: 0309071577; ISBN-13: 9780309071574. Washington, DC; USA.
2. ABNT NBR 6560 (2005), Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por Penetração: Ensaio de Ponto de Amolecimento Anel e Bola. Diário Oficial da União (DOU) nº133: Resolução nº19, Regulamento Técnico nº3/2005; ISSN: 1677-7042. Brasília, Brasil.
3. ABNT NBR 6576 (2005), Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por Penetração: Ensaio de Penetração. Diário Oficial da União (DOU) nº133: Resolução nº19, Regulamento Técnico nº3/2005; ISSN: 1677-7042. Brasília, Brasil.
4. ALMEIDA, F. F. M. de; MELCHER, G. C.; CORDANI, U. G.; KAWASHITA, K.; VANDROS, P. (1968), Radiometric Age Determinations from Northern Brazil. Boletim da Sociedade Brasileira Geológica, Vol. 17, pp. 3-15. São Paulo, Brasil.
5. AL-SUHAIBANI, A.; AL-MUDAIHEEM, J.; AL-FOZAN, F. (1992), Effect of Filler Type and Content on Properties of Asphalt Concrete Mixes. Effects of Aggregates and Minerals Fillers on Asphalt Mixtures Performance: ASTM STP 1147, Edited by Richard C. Meininger. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA; pp. 107-129.
6. ANDERSON, D. A.; BAHIA, H. U.; DONGRE, R. (1992a), Rheological Properties of Mineral Filler-Asphalt Mastics and Their Relationships to Pavement Performance. Effect of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixtures Performance: ASTM STP 1147, Edited by Richard C. Meininger. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA; pp. 131-153.
7. ANDERSON, D. A.; DONGRE, R.; CHRISTENSEN, D. W. (1992b), Effect of Minus N°200-sized Aggregate on Fracture Behavior of Dense-Graded Hot-Mix Asphalt. Effect of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixtures Performance: ASTM STP 1147, Edited by Richard C. Meininger. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA; pp. 154-176.

8. CHAPUIS, R. P.; LÉGARÉ, P-P. (1992), A Simple Method for Determining the Surface Area of Fine Aggregates and Fillers in Bituminous Mixtures. Effect of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixtures Performance: ASTM STP 1147, Edited by Richard C. Meininger. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA; pp. 177-186.
9. CHENG, D. ; LITTLE, D. N. ; LYTTON, R. L.; HOLSTE, J. C. (2003), Moisture Damage Evaluation of Asphalt Mixtures by Considering Both Moisture Diffusion and Repeated-Load Conditions. Transportation Research Record (TRR) n°1832, Paper n°03-2730 ; pp. 42-49.
10. CPRM (2008), Ministério de Minas e Energia - Serviço Geológico do Brasil. Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais. Último acesso em abril de 2008.
11. De La ROCHE (1996), Module de Rigidité et Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux. Thèse de Docteur. École Central de Paris.
12. DNER-ME 78/94 (1994), Agregado Graúdo: Adesividade ao Ligante Betuminoso. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ).
13. DPM/UNESP (2008), Departamento de Petrologia e Metalogenia da Universidade Estadual de São Paulo. Museu de Minerais e Rochas Heinz Ebert, Portal Campus Rio Claro. Último acesso em abril de 2008.
14. DURIEZ, M. e ARRAMBIDE, J. (1962), Nouveau Traité de Matériaux de Construction. Tomes 1, 2 et 3. Dunod, Paris.
15. KIM, Y. R.; KIM, N.; KHOSLA, N. P. (1992), Effects of Aggregate Type and Gradation on Fatigue and Permanent Deformation on Asphalt Concrete. Effect of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixtures Performance: ASTM STP 1147, Edited by Richard C. Meininger. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA; pp. 310-327.
16. KLEIN, E. L. e MOURA, C. A. V. (2003), Síntese Geológica e Geocronológica do Cráton São Luiz e do Cinturão Gurupi na Região do Rio Gurupi (NE-Pará/NW-Maranhão). Revista Geologia, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP), Vol. 3, pp. 97-112. São Paulo, Brasil.
17. MOTTA, L. M. G. e LEITE, L. F. M. (2000), Efeito do Fíler nas Características Mecânicas das Misturas Asfálticas. 11º Congresso Pan-Americano de Engenharia de Trânsito e Transporte, pp. 1019-1030. Gramado, RS.
18. PUZINAUSKAS, V. P. (1969), Filler in Asphalt Mixtures. The Asphalt Institute - Research Report 69-2. Maryland (USA).
19. RADFORD, T. A. (1940), The Construction of Road and Pavements. Edited by McGraw-Hill Company, Inc. 5th edition, New York, USA.
20. RAO, S. K. e SEN, B. R. (1973), Evaluation of Mineral Fillers for Asphalt Paving Mixtures. Highway Research Record n°468, HRB, pp. 100-108.
21. RUIZ, C. (1943), Sobre las Propiedades Mecánicas del Sistema Filler - Betún. LEMIT, Série II, n° 8. Apresentado também na 2ª (1947) e 3ª (1948) Reunión de la Comisión Permanente Del Asfalto. Argentina.
22. SANTANA, H. (1995), Considerações sobre os Nebulosos Conceitos e Definições de Filler em Misturas Asfálticas. 29ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv), vol. 1; pp. 574-604 - Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv). Cuiabá, MT.
23. SANTANA, H. (1992), Manual de Pré-Misturados a Frio. Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP) - 1ª Edição. Rio de Janeiro (RJ).
24. SEBAALY, P. E.; HITTI, E.; WEITZEL, D. (2003), Effectiveness of Lime in Hot-Mix Asphalt Pavements. Transportation Research Record 1832, Paper N°03-2126; pp. 34-40.
25. SI, Z.; LITTLE, D. N.; LYTTON, R. L. (2002), Evaluation of Fatigue Healing Effect of Asphalt Concrete by Pseudostiffness. Transportation Research Record 1789, Paper N°02-2832; pp. 73-79.
26. WIKIPÉDIA (2008), A Enciclopédia Livre. Último acesso em abril de 2008.