

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE LIGANTES ASFÁLTICOS (ABS) Y EL TRABAJO DE ADHESIÓN ($W^a_{L,S}$) DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS, MEDIANTE DETERMINACIONES DE ÁNGULO DE CONTACTO

DETERMINATION OF TENSILE STRENGTH OF ASPHALT BINDERS (ABS) AND WORK OF ADHESION ($W^a_{L,S}$) OF ASPHALT BINDERS, USING CONTACT ANGLE DETERMINATIONS

Fecha de recepción: 02 de Septiembre de 2015

Fecha de aceptación: 08 de Enero de 2016

Químico, Jorge Salazar Delgado
Unidad de Materiales y Pavimentos
LanammeUCR, Costa Rica
E-mail: jorge.salazardelgado@ucr.ac.cr

Juan F. Pacheco Fallas
Estudiante de Ingeniería Química
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
E-mail: juan.pachecofallas@ucr.ac.cr

Ing. María José Jiménez Alvarado
Investigadora
LanammeUCR, Costa Rica
E-mail: mariajose.jimenez@ucr.ac.cr

RESUMEN

Debido a los problemas generados por el agua en muchos de los pavimentos alrededor del mundo se ha buscado una forma de mejorar los materiales que componen las mezclas asfálticas. Con este fin se han desarrollado diferentes métodos para poder medir las propiedades de los materiales que se relacionen con el daño por humedad. Los métodos que se describen son conocidos como ensayos de goniometría y ensayos de resistencia a la tracción de asfaltos (ABS).

Parte de las investigaciones en este campo están enfocadas en las propiedades físico-químicas de los asfaltos relacionadas con falla por adhesión. Este artículo pretende describir dos de los principales métodos de ensayo utilizados en laboratorios para medir el trabajo de adhesión en los ligantes asfálticos y emulsiones. Los procedimientos aquí descritos pueden ser de interés para los ingenieros y profesionales que trabajan en el diseño de pavimentos y en áreas afines.

PALABRAS CLAVE:

Daño por humedad, adhesión, energía superficial libre, enlace asfalto-agregado, goniómetro.

ABSTRACT

Due to problems related to water in many pavements around the world it has been searched a way to improve the materials that compose asphalt mixtures. For this purpose different test methods have been developed to measure the properties of the materials related with moisture damage. The test methods that are described are known as goniometry test and asphalt bond strength test (ABS).

Many researches in this field are focused on the physicochemical properties of asphalts related with adhesion failure. This article aims to describe two of the main test methods that are used in laboratories in order to measure the work of adhesion in asphalt binders and emulsions. Procedures described here can be of interest to engineers and professionals that work in pavement design and related areas.

KEY WORDS:

Moisture damage, adhesion, surface free energy, asphalt-aggregate bond, goniometer.

1. INTRODUCCIÓN

La adhesión se define como la atracción entre átomos y moléculas a nivel de superficie de distintos materiales cuando entran en contacto, se puede entender como el estado en el que dos superficies se mantienen unidas por fuerzas que pueden ser químicas o mecánicas. El fenómeno de adhesión entre asfalto y agregado ha sido objeto de estudio en mayor medida en años recientes, sin embargo se han desarrollado a lo largo del tiempo diferentes teorías que intentan hallar una explicación para este fenómeno. Las cuatro teorías principales son: Teoría de adhesión mecánica, Teoría de adhesión por reacción química, Teoría de Orientación Molecular y Teoría de Energía Interfacial (Kim, 2009).

La mayoría de investigadores consideran que el fenómeno de adhesión asfalto-agregado es muy complejo para explicarlo basándose solamente en una teoría. Por esto, la adhesión asfalto-agregado se ve mejor explicada por una combinación de principios mecánicos, químicos y termodinámicos desarrollados en las teorías mencionadas anteriormente. Los principios mecánicos se basan en que durante el proceso de mezcla, el asfalto se ve forzado a ingresar a los poros y demás irregularidades a nivel micrométrico presentes en la superficie del agregado, generando puntos de enclavamiento. Los principios químicos hacen referencia a reacciones químicas entre el asfalto absorbido y el agregado dando lugar a la formación de enlaces. Finalmente, desde el punto de vista termodinámico la adhesión está relacionada a la energía superficial del sistema asfalto-agregado, aspectos como la mojabilidad de la superficie del agregado por parte del asfalto o bien, el desnudamiento del asfalto de la superficie del agregado son causados por cambios en la energía libre del sistema (Bahia, 2007).

1.1 Teoría de Energía Libre Superficial

La energía superficial libre (ESL) es de suma importancia ya que con los valores de ESL de un asfalto y de un agregado se puede obtener el trabajo de adhesión de dicha combinación en presencia de agua, lo cual está directamente relacionado con el daño por humedad.

La ecuación de Young-Dupré se utiliza como base para describir las interacciones entre las fuerzas de cohesión, las fuerzas de adhesión y para medir energía superficial (Clegg, 2013). Por medio de la ecuación propuesta por Van Oss et al. (1998), es posible relacionar las variables descritas anteriormente (Wei et al., 2010).

$$\gamma_L^{\text{Tot}}(1 + \cos\theta) = \left(2\sqrt{\gamma_L^{\text{LW}}}\right)x_1 + \left(2\sqrt{\gamma_L^-}\right)x_2 + \left(2\sqrt{\gamma_L^+}\right)x_3$$

Ecuación 1

La energía superficial libre total (γ^{TOT}) se divide principalmente por un componente no polar o dispersiva (γ^{LW}) y un

componente ácido-base que representa las interacciones polares (γ^+, γ^-). Donde γ^{TOT} es la energía superficial libre de un asfalto o un agregado. A continuación se mencionan los términos de la ecuación (1):

γ^{LW} = componente Lifshitz-van der Waals de la energía superficial.

γ^+ = componente ácido de Lewis de interacción superficial (acepta electrones).

γ^- = componente básico de Lewis de interacción superficial (dona electrones).

θ = ángulo de contacto medido en radianes.

En la ecuación (1) el subíndice “L” se refiere al líquido de prueba respectivo, cuyos componentes son conocidos. A partir de esta ecuación se crea un sistema de ecuaciones con el cual es posible encontrar las componentes de energía libre para los asfaltos y los agregados utilizados $\gamma^{\text{LW}}, \gamma^+, \gamma^-$, ya que las variables x_1, x_2, x_3 corresponden a $\sqrt{\gamma_s^{\text{LW}}}, \sqrt{\gamma_s^-}, \sqrt{\gamma_s^+}$ respectivamente, siendo el subíndice “S” el sustrato o sólido.

Para medir el ángulo de contacto θ se utiliza el método de la gota sésil, este consiste en medir el ángulo de contacto estático entre un líquido y una superficie horizontal, esta superficie puede ser el agregado o placas de vidrio bañadas con un capa fina de asfalto (Wei et al., 2010).

1.2 Trabajo de cohesión

El trabajo o la energía libre de cohesión es la formación de una unión cohesiva entre dos partes de un mismo material y está descrito con la ecuación (2) y se observa en la Figura 1(a) (Wang, 2011).

$$W_{AA} = -\Delta G_a^c = 2\sqrt{\gamma^{\text{TOT}}}$$

Ecuación 2

1.3 Trabajo de adhesión

El trabajo de adhesión en condición seca corresponde a la formación de una unión adhesiva entre dos partes de diferentes materiales y se calcula con la ecuación (3). En esta ecuación los subíndices a y b se refieren a las fases agregado y ligante asfáltico respectivamente (Wang, 2011). Es posible observar la representación gráfica mediante la Figura 1(b):

$$W_{AB} = \Delta G_{ab}^{\text{as}} = 2\sqrt{\gamma_a^{\text{LW}}\gamma_b^{\text{LW}}} + 2\sqrt{\gamma_a^+\gamma_b^-} + 2\sqrt{\gamma_a^-\gamma_b^+}$$

Ecuación 3

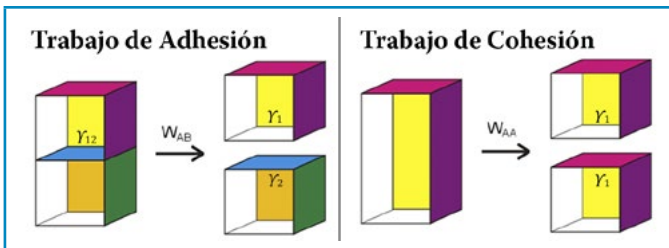


Figura 1 (a) Trabajo de adhesión entre dos sustancias incompatibles y (b) trabajo de cohesión de una misma sustancia (Hansen, 2004).

1.4 Pérdida de adherencia

La pérdida de adherencia o reducción en la energía libre del sistema cuando el agua desplaza al ligante asfáltico de la interfaz asfalto-agregado se encuentra mediante la (4), donde los subíndices a, b y w hacen referencia a agregado, ligante asfáltico y agua respectivamente (Little et al., 2006).

$$W_{ABW}^{wet} = \Delta G_{abw}^{ah} = \gamma_{aw} + \gamma_{bw} - \gamma_{ab}$$

Ecuación 4

1.5 Parámetros de energía

Con los términos de las ecuaciones (2), (3) y (4) se definen dos parámetros de energía, ER1 y ER2, con los cuales es posible describir la resistencia de un asfalto al daño por humedad.

$$ER_1 = \left| \frac{W_{AB}}{W_{ABW}^{wet}} \right|$$

$$ER_2 = \left| \frac{W_{AB} - W_{AA}}{W_{ABW}^{wet}} \right|$$

Ecuación 5

La principal causa que genera que se pierda el enlace adhesivo entre estos materiales se debe al ingreso de agua al sistema asfalto-agregado y se conoce como daño por humedad. El efecto más notorio provocado por el daño por humedad corresponde al desnudamiento (stripping), el cual se caracteriza como una falla adhesiva que ocurre por la pérdida de enlace entre el asfalto y la superficie del agregado.

1.6 Mecanismos de desnudamiento

Se han identificados algunos mecanismos de desnudamiento, los cuales se describen a continuación:

- Separación (Detachment): se define como la separación de la película de asfalto de la superficie del agregado por una fina película de agua. El mecanismo de separación se explica por la Teoría de Energía Interfacial, que indica que sistemas termodinámicamente estables tienden a preferir estados de equilibrio de baja energía superficial. Según nuevos estudios,

la introducción de agua al sistema crea un aumento de energía y este aumento de energía permite que el sistema tienda a un nuevo estado de equilibrio con energía más baja, siendo este el sistema agregado-agua (Wang, 2011).

- Desplazamiento: se caracteriza por el empuje hacia atrás de la película de asfalto por el agua y el reemplazo de la misma. Se da como resultado de la penetración de agua hasta la superficie del agregado desde una rotura en la capa de asfalto. Estos espacios se generan por un mal recubrimiento del agregado en el proceso de mezcla o bien por agujeros que se presentan cuando el agregado tiene una capa de polvo sobre su superficie lo que hace que no se dé el enlace asfalto-agregado. El mecanismo de desplazamiento se puede explicar por principios de energía superficial similares a los usados en el mecanismo de Separación (Tarrer et al., 1991).
- Emulsificación espontánea: algunas composiciones de asfalto permiten que el agua y el asfalto se combinen y formen una emulsión de gotas de agua en el asfalto. La emulsificación va a ser un detonante para el mecanismo de desnudamiento por separación una vez que la emulsión alcance la superficie del agregado (Association of Asphalt Paving Technologists, 1974).
- Presión de poro: este mecanismo se da como resultado de la reducción de los vacíos de aire en el pavimento HMA debido a las cargas ejercidas por el tráfico. Bajo estas cargas el agua presente en dichos vacíos aumenta su presión y se incrementa así la presión sobre la capa de asfalto. Bajo cargas repetidas esta presión llega a un nivel en el que causa una ruptura de la capa de asfalto, dando así lugar a que el agua llegue a la superficie del agregado y se dé el desnudamiento por el mecanismo de desplazamiento (Wang, 2011).
- Socavamiento hidráulico: este mecanismo se da sobre la superficie de rodamiento y se debe al movimiento de las llantas sobre el pavimento húmedo. Conforme la llanta rueda sobre el pavimento, el agua en el frente de la llanta se presiona hacia abajo, llenando los espacios vacíos de la superficie; mientras que la parte trasera de la llanta succiona el agua. Esta acción somete al pavimento a miles de ciclos de carga de tensión-compresión (Cheng, 2002).

2. OBJETIVO

Describir los métodos de ensayo utilizados en laboratorio para medir cualitativa y cuantitativamente el trabajo de adhesión de un ligante asfáltico.

3. EQUIPO Y MATERIALES

3.1 Ensayo de goniometría

La medición del ángulo de contacto se realiza mediante un goniómetro Ramé-hart Instrument, el cual cuenta con un equipo de iluminación por fibra óptica, una cámara digital de alta definición y utiliza el programa DROPImage. El método de la gota sésil, se utilizaba originalmente en la industria de pinturas y pigmentos, pero se adaptó para utilizarlo en asfaltos.



Figura 2 Equipo de goniometría (a) con gotero manual (b) con jeringa dispensadora.

El equipo de goniometría se modula de dos maneras diferentes como se observa en la Figura 2, la primera con un gotero manual (a) con una serie de líquidos de prueba previamente seleccionados para calcular ESL; y la segunda con un controlador de temperatura conectado a una jeringa dispensadora (b) para elaborar las gotas con asfalto a temperatura controlada. Este equipo también cuenta con una cámara ambientadora para realizar pruebas en condiciones de temperatura y humedad controladas, pero tiene un tamaño muy reducido, por tal razón si los sustratos para medición son más grandes que los de la cámara conviene acondicionarlos a las condiciones ambientales normales del laboratorio.

Cuando se modula el equipo como se observa en la figura 2(a), se utilizan cuatro líquidos de prueba: agua MQ, etilenglicol ACS, formamida ACS y glicerina ACS y se busca obtener la mejor combinación de tres de estos.

3.2 Ensayo de ABS

La medición del valor de la resistencia a la tracción del sistema asfalto agregado se realiza mediante el equipo PATTI QUANTUM GOLD, el cual se ajusta a la norma AASHTO TP 91-11. Dicha norma tiene como objetivo cuantificar la fuerza de tensión necesaria para remover un tornillo adherido con asfalto a una superficie sólida. El software que controla el equipo se denomina PQGold y se encarga de la entrada y salida de datos.

4. PROCEDIMIENTO

4.1 Ensayo de goniometría

Se llena el dispensador manual de gotas con el líquido previamente seleccionado, luego se nivela la superficie para colocar de seis a diez gotas en cada placa y con el DROPImage se mide el ángulo de contacto de cada gota, a una temperatura ambiente de 25 °C. Las superficies que se utilizan son placas de vidrio de 7,62 cm x 2,54 cm (láminas porta-objetos) con una capa delgada de asfalto. Estas placas se colocaron en

un tendedero y luego en el horno para remover el exceso de asfalto en cada una. Cuando la superficie a utilizar es el agregado, este se debe pulir para que sea lo más lisa posible, con el fin de reducir la rugosidad y de esta forma comparar entre agregados tratados con la misma metodología.

Para fabricar las gotas de asfalto en caliente primero se colocan los asfaltos en el horno a una temperatura de 140 °C durante 120 minutos. Se insertan capilares nuevos dentro del beaker con el asfalto respectivo y se espera por al menos 60 minutos. Estos se deben sacar con cuidado, limpiarlos exteriormente para que no queden residuos y esperar a que se enfríen.

Se debe encender la jeringa con control de temperatura a 165 °C, nivelar la superficie del agregado y distanciar la punta de la jeringa de la superficie 2,54 cm. Se inserta el capilar dentro del dispositivo con la jeringa caliente por aproximadamente 60 segundos, hasta que caiga la primera gota; es necesario mover la superficie cuidadosamente para que la siguiente gota caiga al lado y así sucesivamente.

Luego con el programa DROPImage se realizan las mediciones de ángulo de contacto. Se acepta que la mediciones de las gotas con asfalto tengan hasta un 5% de diferencia entre el ángulo izquierdo y derecho que mide el programa, esto para obtener una gota lo más simétrica posible. Cada vez que se

cambie el tipo de asfalto a utilizar es necesario limpiar el equipo.

Una fotografía de una gota de asfalto capturada por el programa se puede observar en la figura 3, con este perfil es posible medir el ángulo de contacto.

Previo a la preparación de la muestra de asfalto es necesario lavar minuciosamente los tornillos con el fin de eliminar restos de asfalto previo u otro material, posteriormente se colocan en el horno de convección forzada a $150\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 30 min para eliminar restos de humedad. De manera paralela se lleva el asfalto hasta los $150\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y cuando se

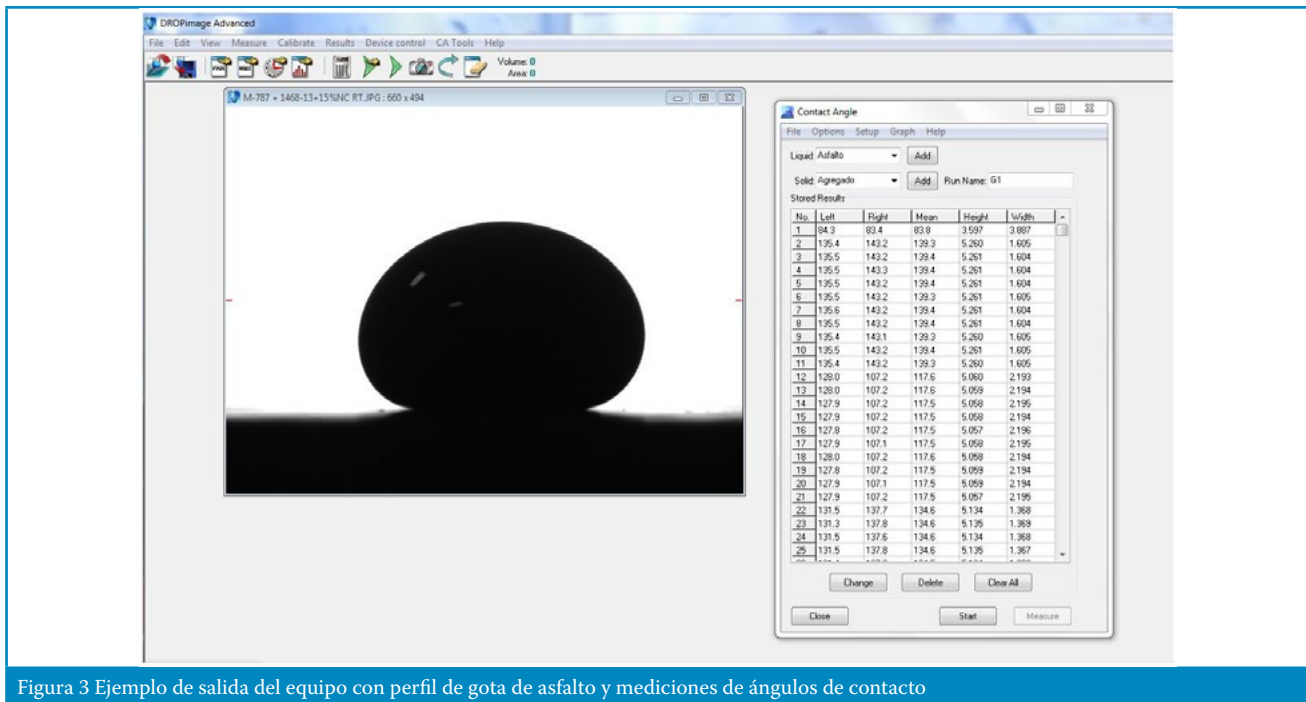


Figura 3 Ejemplo de salida del equipo con perfil de gota de asfalto y mediciones de ángulos de contacto

4.2 Ensayo de ABS

En cuanto a la preparación del agregado, primero se toman las muestras de agregado, este se corta en forma de discos o en rectángulos de alrededor de 2,54 cm y se pulen con lija de carburo de silicio número 280 hasta que la superficie se muestre prácticamente lisa, al igual que para el ensayo de goniometría, con esto se pretende que la adhesión entre el asfalto y el agregado se dé únicamente por mecanismos químicos y no mecánicos. Una vez finalizado este proceso, se llevan las muestras de agregado a un baño ultrasónico a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ por un periodo de 60 minutos con el fin de eliminar residuos sólidos de la superficie, pasado este punto se introducen las mismas a un horno de convección forzada que se encuentra a $150\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 30 minutos para eliminar residuos de humedad. Un ejemplo del agregado ya preparado se muestra en la Figura 4.



Figura 4 Ejemplo de agregados preparados para su uso en el ensayo ABS.

encuentra fluido se retira del horno y se vierten $0,40\text{g} \pm 0,05\text{g}$ de asfalto sobre la cabeza de cada tornillo.

Cuando se tienen los tornillos preparados se llevan al horno de tiro forzado, donde permanecen 10 minutos a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ con el fin de alcanzar la temperatura de aplicación. En este punto se procede a retirar los tornillos uno a uno del horno y se van colocando de manera perpendicular sobre la superficie del agregado ejerciendo una presión firme hacia abajo. Se debe evitar girar el tornillo para impedir que ingrese aire al sistema. En este punto se drenan pequeños excesos de asfalto por los bordes de la cabeza del tornillo, ver Figura 5.



Figura 5 Muestras colocadas sobre el agregado

Se pueden evaluar dos condiciones de la matriz asfalto-agregado, una seca y una húmeda. Para la condición seca se deja que el sistema se aclimate a las condiciones del laboratorio durante 24 horas antes de ensayarla. Para el caso de condición húmeda, la muestra se deja durante una hora a temperatura ambiente (25 °C) y posteriormente se pasa a un baño de agua a una temperatura de 60 °C ± 2 °C, donde es sumergida completamente, por un periodo de 24 horas; concluido este periodo se retiran las muestras del baño y se permite que se aclimaten a las condiciones del laboratorio durante 2 horas antes de ensayarlas.

Es necesario realizar una calibración de la razón de carga de presión del equipo. Se coloca talco en el empaque dentro del pistón y encima de este se pone el plato de reacción como se observa en la figura 6. Además, en la figura 6 es posible apreciar la posición de la prensa, que debe sujetar firmemente el conjunto plato-pistón. Seguidamente se selecciona dentro del software del equipo las dimensiones del tornillo y del pistón que se utilizarán, en este caso son 20 mm y F-4 respectivamente.



Figura 6 Plato de reacción sujetado sobre el pistón mediante una prensa

La calibración se inicia aplicando presión al sistema mediante el equipo y se recopilan los datos de resistencia a la tracción contra el tiempo, de estos datos se obtiene una gráfica a la cual se le realiza un ajuste de regresión lineal, con el cual se utiliza el valor de la pendiente. Dicha pendiente debe tener un valor fijo según las dimensiones de tornillo y pistón, para el caso del pistón F-4 la pendiente debe ser igual a 50 o muy cercana. Si el valor obtenido es muy distinto, se requiere ajustar la razón. Un ejemplo de curva de calibración se muestra en la Figura 7.

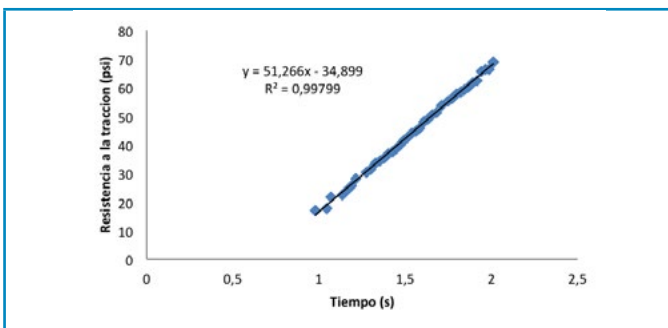


Figura 7 Curva de calibración de la razón de carga

Al terminar la calibración con la razón de carga debidamente ajustada se procede a ensayar las muestras, para esto se atornilla el pistón sobre la muestra por ser ensayada, tal como se muestra en la Figura 8. Posteriormente se sigue el mismo procedimiento de la calibración pero con una diferencia: se deja de suministrar aire una vez que la muestra ha fallado. Cuando esto ocurre se toma del software el valor máximo de resistencia a la tensión, a partir de este valor y haciendo uso de la ecuación (7) se obtiene el parámetro conocido como POTS (Pull-Off Tensile Strength), el cual se refiere a la resistencia a la tracción de arranque y tiene unidades de psi.



Figura 8 Configuración del equipo antes de comenzar el ensayo.

$$POTS = \frac{(BP * A_g) - C}{A_{ps}}$$

Ecuación 7

Donde:

- A_g: área de contacto del empaque con el plato de reacción (mm²)
- BP: presión en el punto de explosión (psi)
- A_{ps}: área de la cabeza del tornillo (mm²)
- C: constante del pistón

Este valor es de gran interés, puesto que se utiliza para el análisis de los resultados obtenidos. Un ejemplo del tratamiento de los resultados obtenidos se muestra en la Figura 9, donde se comparan valores POTS encontrados analizando diferentes agregados y asfaltos.

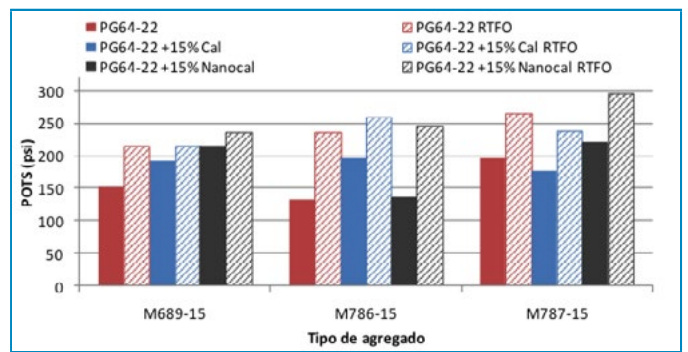


Figura 9 Comparación de valores POTS.

Por último, además de la recopilación de datos explicada anteriormente es importante registrar el mecanismo de fallo. Para esto se examina visualmente la superficie dejada por la muestra y se determina según sea dicha superficie si el fallo ocurrió por el mecanismo de adhesión o bien, por el de cohesión. Como ejemplo de este análisis visual se muestra la Figura 10.

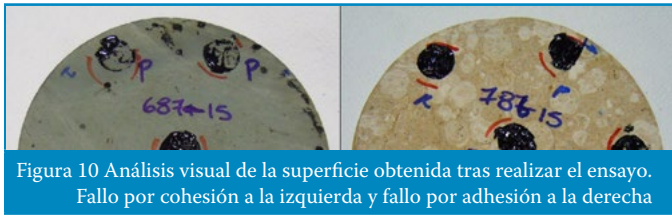


Figura 10 Análisis visual de la superficie obtenida tras realizar el ensayo. Fallo por cohesión a la izquierda y fallo por adhesión a la derecha

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el goniómetro es posible obtener ángulos de contacto con el método de la gota sésil, a su vez con estos valores se realizan los cálculos para obtener energía libre superficial de los asfaltos y agregados.

Al utilizar ambos ensayos, ABS y goniometría, se puede corroborar la tendencia al desprendimiento y humectabilidad de algunos asfaltos.

La escogencia de los líquidos de prueba a utilizar en los ensayos de goniometría se debe estudiar más a fondo.

Los procedimientos descritos anteriormente pretenden servir como base para pruebas de adhesión de ligantes asfálticos y para poder comprender mejor el fenómeno de daño por humedad.

El ensayo ABS permite determinar cuantitativa y cualitativamente el efecto del daño por humedad sobre el enlace asfalto-agregado de una manera económica, sencilla y precisa.

El efecto que provoca el uso de diferentes aditivos, por ejemplo polímeros o compuestos anti desnudantes, sobre la fuerza del enlace asfalto agregado, la cohesión del asfalto y la resistencia al daño por humedad puede ser cuantificado mediante el ensayo ABS.

Los resultados obtenidos a través del ensayo ABS pueden ser usados para crear comparaciones de la fuerza del enlace asfalto-agregado en diferentes tipos de agregados, y la susceptibilidad al daño por humedad que presenta cada uno.

BIBLIOGRAFÍA

- Bahia, H., Hanz, A., Kanitpong, D. K., & Wen, D. H. (2007). *Test Method to Determine Aggregate/Asphalt Adhesion Properties and Potential Moisture Damage*. Wisconsin, USA: Wisconsin Highway Research Program.
- Cheng, D. X., Little, D. N., Lytton, R. L., & Holste, J. C. (2001). *Surface Free Energy Measurement Of Aggregates And Its Application To Adhesion And Moisture Damage Of Asphalt-Aggregate Systems*. College Station, Tex.
- Cheng, D., Little, D. N., Lytton, R. L., & Holste, J. C. (2002). Surface Energy Measurement of Asphalt and Its Application to Predicting Fatigue and Healing in Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.
- Clegg, C. (2013). *Contact Angle Made Easy* (Primera ed.). New Jersey, USA.
- Fromm, H. J. (1974). The Mechanisms of Asphalt Stripping from Aggregate Surfaces. *Association of Asphalt Paving Technologists*.
- Hansen, F. K. (2004). *The Measurement of surface energy of polymer by means of contact angles of liquids on solid surfaces*. University of Oslo, Department of Chemistry.
- Hefer, A. W., Bhasin, A., & Little, D. N. (2006). Bitumen Surface Energy Characterization Using a Contact Angle Approach. *Journals of Materials in Civil Engineering*, 18 (6), 759-767.
- Kim, Y. R. (2009). *Modeling of Asphalt Concrete*. New York: McGraw-Hill Professional.
- Little, D. N., & Bhasin, A. (2006). *Using Surface Energy Measurements to Select Materials for Asphalt Pavement*. Texas Transportation Institute. College Station, Tex.
- Tarrer, A. R., & Wagh, V. (1991). *The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding*. Washington, D.C.
- Van Oss, C. J., Chaudhury, M. K., & Good, R. J. (1988). Interfacial Lifshitz-van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems. (A. C. Society, Ed.) *Chem. Rev.*, 88 (6), 927-941.
- Wang, L. (2011). *Mechanics of Asphalt: Microstructure and Micromechanics*. New York: McGraw-Hill Professional.
- Wei, J., & Zhang, Y. (2010). Influence of Aging on Surface Free Energy of Asphalt Binder. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 3 (6), 343-351.