



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

LM-PI-UMP-080-R1

ENERGÍA SUPERFICIAL DE ASFALTOS Y AGREGADOS

Preparado por:

Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica

Junio, 2018

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

Preparado por: Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-
LanammeUCR jose.aguiar@ucr.ac.cr




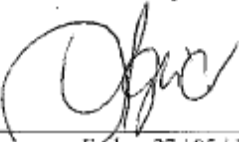
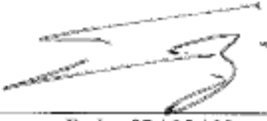
1. Informe LM-PI-UMP-080-R1		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: ENERGÍA SUPERFICIAL DE ASFALTOS Y AGREGADOS		4. Fecha del Informe Junio, 2018
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
6. Resumen <i>La energía superficial es una característica intrínseca de todo material. Tal energía es la responsable en gran medida de las interacciones entre los distintos materiales. En el caso de un pavimento, la estimación de la energía superficial permite inferir en el comportamiento de sus materiales constituyentes: asfalto y agregado. Se encontró que la afinidad de estos materiales por el agua, así como la basicidad del agregado, son factores que influyen el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas expuestas a condiciones severas de humedad.</i> <i>Por lo tanto, la investigación científica llevada a cabo permite contribuir en la generación de un criterio de selección que asegure la escogencia de los materiales capaces de producir mezclas asfálticas que sean resistentes al daño por humedad.</i>		
7. Palabras clave Energía superficial, asfalto, agregado, daño por humedad	8. Nivel de seguridad: Ninguno	9. Núm. de páginas 13
10. Preparado por: Quím. Alejandra Baldi Sevilla, M.Sc. Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 27 / 05 / 19		
11. Revisado por:: Ing. José Pablo Aguilar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos, PITRA  Fecha: 27 / 05 / 19	12. Aprobado por: Ing. Guillermo Loria Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA  Fecha: 27 / 05 / 19	



TABLA DE CONTENIDOS

1. Introducción.....	pág. 5
2. Implementación del ensayo y resultados obtenidos.....	5
3. Consideraciones finales.....	8
4. Publicaciones generadas.....	9
Anexo 1 – Propuesta de Modificación al CR-2010.....	10
Anexo 2 – Determinación de los valores límite.....	14



ÍNDICE DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. De izquierda a derecha: Goniómetro; ángulo de contacto entre una gota de agua y una superficie hidrofílica; ángulo de contacto entre una gota de agua y una superficie hidrófoba	5
Figura 2. Correlación entre la afinidad de asfaltos y agregados por el agua y el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas sujetas a acondicionamiento húmedo.....	8
Figura 3. Influencia de la basicidad del agregado sobre la adhesión y desplazamiento en presencia de agua de la interfaz asfalto-agregado.....	8



1. Introducción

El daño por humedad es una de las fallas más importantes en pavimentos, principalmente en países con índices altos de precipitación. El grado de afectación que tendrá una mezcla asfáltica está ligado a las características fundamentales de sus materiales componentes, entre ellas, la energía superficial (ES).

La energía superficial está definida por la composición química del material. A partir del valor de ES de los asfaltos y los agregados es posible estimar en qué medida se dará una interacción entre éstos y el agua: una interacción favorable aumentaría la susceptibilidad del pavimento a presentar daño por humedad. Tal susceptibilidad es la detonante de los mecanismos de falla más reconocidos para este deterioro: el desnudamiento y el desmoronamiento. El primer mecanismo es causado por la poca adhesión entre el asfalto y el agregado, lo cual hace que la interfaz resultante sea propensa a romperse y colapsar. El segundo mecanismo es producto de la pérdida de cohesión entre las partículas de asfalto, lo cual resulta en el desprendimiento de agregados de la superficie del pavimento.

En este sentido, la estimación de la energía superficial, así como los correspondientes parámetros de susceptibilidad al agua de asfaltos y agregados, resultan de gran utilidad para el desarrollo de criterios que permitan efectuar una selección de materiales con un buen desempeño, inclusive en condiciones de humedad alta.

2. Implementación del ensayo y resultados obtenidos

La preparación de las muestras y la implementación del ensayo, así como las consideraciones generales se detallan en el Anexo 1. A manera de resumen, la energía superficial de asfaltos y agregados se estima con un goniómetro, el cual mide el ángulo de contacto entre la superficie sólida del material y una gota de un disolvente determinado (Figura 1).

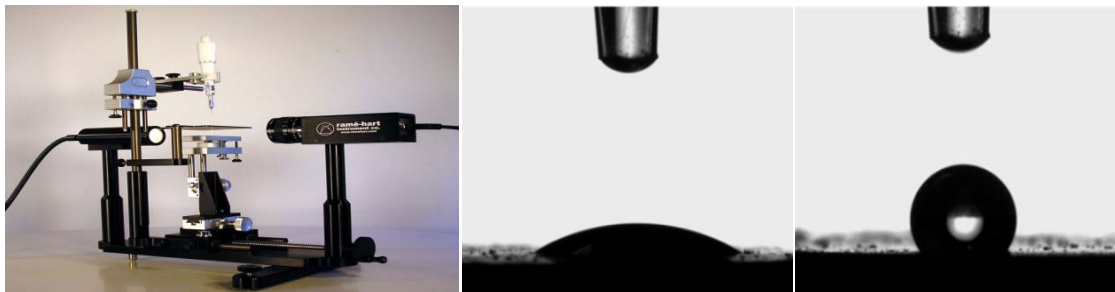


Figura 1. De izquierda a derecha: Goniómetro; ángulo de contacto entre una gota de agua y una superficie hidrofílica; ángulo de contacto entre una gota de agua y una superficie hidrófoba.

La energía superficial se compone por tres factores: el componente dispersivo (γ^{LW}), el componente ácido (γ^+) y el componente básico (γ^-) (Ecuación 1).

$$\gamma^{total} = \gamma^{LW} + 2\sqrt{\gamma^+\gamma^-} \quad \text{Ec. 1}$$



La obtención de los componentes γ , y, por lo tanto, la energía superficial total, del material de interés requiere de la resolución de un sistema de tres ecuaciones (Ecuación 2). Se requieren tres líquidos de prueba, $L1$, $L2$ y $L3$, de forma que sea posible construir tal sistema.

$$\begin{cases} (1 + \cos\theta_{L1}) = 2\sqrt{\gamma_{L1}^{LW}\gamma_S^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_{L1}^+\gamma_S^-} + 2\sqrt{\gamma_{L1}^-\gamma_S^+} \\ (1 + \cos\theta_{L2}) = 2\sqrt{\gamma_{L2}^{LW}\gamma_S^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_{L2}^+\gamma_S^-} + 2\sqrt{\gamma_{L2}^-\gamma_S^+} \\ (1 + \cos\theta_{L3}) = 2\sqrt{\gamma_{L3}^{LW}\gamma_S^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_{L3}^+\gamma_S^-} + 2\sqrt{\gamma_{L3}^-\gamma_S^+} \end{cases} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde θ_{L1} , θ_{L2} y θ_{L3} son los ángulos de contacto medidos entre cada líquido de prueba y la superficie sólida del material de interés; γ_{Ln}^{LW} (para $n=1; 2$ y 3) es el componente dispersivo del líquido de prueba; γ_{Ln}^+ (para $n=1; 2$ y 3) es el componente ácido del líquido de prueba y γ_{Ln}^- (para $n=1; 2$ y 3) es el componente básico del líquido de prueba; γ_S^{LW} , γ_S^+ y γ_S^- son los componentes dispersivo, ácido y básico de la superficie de interés, respectivamente.

Los valores de energía superficial calculados mediante esta técnica permiten obtener otros parámetros, tales como la energía de adhesión entre el asfalto y el agregado, W_{AB} ; así como el potencial de desnudamiento del asfalto en presencia de agua, W_{wet} (Ecuaciones 3 y 4, respectivamente). Estos mecanismos son altamente reconocidos como los detonantes del daño por humedad en mezclas asfálticas, ya que están relacionados con el desnudamiento.

$$W_{AB} = 2\sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_B^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_A^+\gamma_B^-} + 2\sqrt{\gamma_A^-\gamma_B^+} = \gamma_A^{total} + \gamma_B^{total} - \gamma_{AB} \quad \text{Ec. 3}$$

$$W_{wet} = \gamma_{AW} + \gamma_{BW} - \gamma_{AB} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde los subíndices A y B representan al agregado y al asfalto, respectivamente; los términos γ_{AB} , γ_{AW} y γ_{BW} se obtienen despejando las Ecuaciones 3; 6 y 7, respectivamente.

Se espera que una combinación asfalto-agregado con un valor alto de adhesión presente una mayor compatibilidad entre ambos, lo cual es deseable. Por otro lado, aquella interfaz con un valor bajo de desplazamiento en presencia de agua será menos susceptible al desnudamiento. Estos dos parámetros se representan en una sola razón llamada razón de energía y denotada como ER, por sus siglas en inglés (Ecuación 5). Se espera que las combinaciones más resistentes a la humedad tengan un valor de ER alto.

$$\left| ER = W_{AB} / W_{wet} \right| \quad \text{Ec. 5}$$

Es posible relacionar los parámetros W_{AB} , W_{wet} y ER de los materiales componentes de las mezclas con el desempeño mecánico de las mismas luego de ser sometidas a acondicionamiento húmedo. De igual



manera, es posible relacionar tal desempeño mecánico con los parámetros de afinidad al agua de asfaltos y agregados, denotados como W_{BW} y W_{AW} , respectivamente (Ecuaciones 6 y 7, respectivamente). Se espera que valores altos de afinidad por el agua de estos materiales sean sinónimo de una mayor susceptibilidad al daño por humedad de la mezcla asfáltica resultante.

$$W_{AW} = 2\sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_W^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_A^+\gamma_W^-} + 2\sqrt{\gamma_A^-\gamma_W^+} = \gamma_A^{total} + \gamma_W^{total} - \gamma_{AW} \quad \text{Ec. 6}$$

$$W_{BW} = 2\sqrt{\gamma_B^{LW}\gamma_W^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_B^+\gamma_W^-} + 2\sqrt{\gamma_B^-\gamma_W^+} = \gamma_B^{total} + \gamma_W^{total} - \gamma_{BW} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde γ_W^{LW} , γ_W^+ y γ_W^- son los componentes dispersivo, ácido y básico del agua, respectivamente.

Al realizar las comparaciones y el análisis de datos, los resultados obtenidos permitieron concluir lo siguiente:

1) El daño por humedad es un proceso sumamente complejo que involucra la ocurrencia simultánea de diversos mecanismos de transporte de agua en el interior de la estructura. Ante esto, se considera que los parámetros fisicoquímicos propuestos en la literatura (trabajo de adhesión, W_{AB} ; trabajo de desplazamiento, W_{wet} y razón de energía, ER) son herramientas útiles en la descripción de la susceptibilidad de la interfaz asfalto-agregado a sucumbir por efecto del agua. Sin embargo, dada la naturaleza termodinámica de tales parámetros, éstos describen principalmente el fenómeno de desnudamiento, al cual no puede atribuírsele completamente el deterioro de una mezcla asfáltica debido a la humedad.

2) De acuerdo al punto anterior, se considera que los parámetros relacionados con la compatibilidad entre asfaltos y agregados (W_{AB}), así como entre éstos y el agua (W_{AW} y W_{BW}) determinados a partir de los valores de energía superficial, son de suma importancia para una correcta caracterización y selección de materiales para pavimentos, en términos de su resistencia al daño por humedad.

3) Existe una relación inversamente proporcional entre la afinidad por el agua de los asfaltos y agregados y la pérdida del módulo de las mezclas asfálticas resultantes luego del acondicionamiento húmedo (Figura 2).

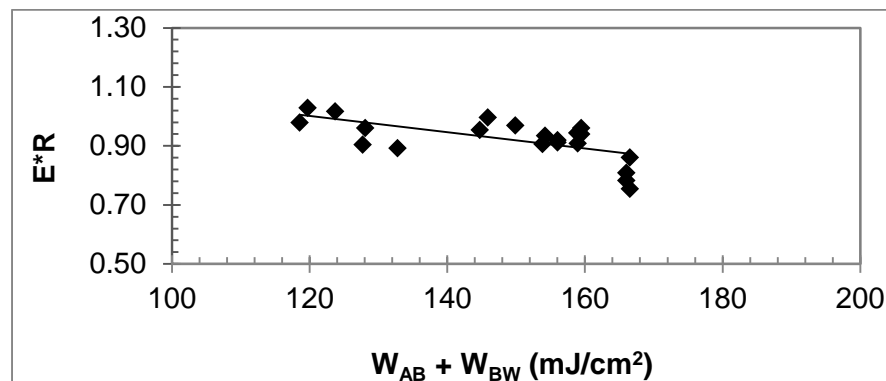




Figura 2. Correlación entre la afinidad de asfaltos y agregados por el agua y el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas sujetas a acondicionamiento húmedo.

4) La basicidad del agregado es una característica relevante en la producción de interfaces asfalto-agregado de buena calidad. Entendiéndose como buena calidad una adhesión alta entre ambos y una susceptibilidad baja al desnudamiento, lo cual es propiciado por agregados básicos (Figura 3).

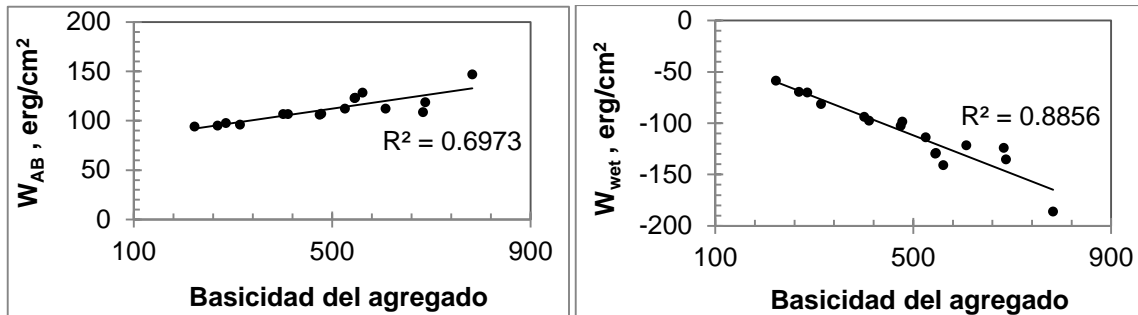


Figura 3. Influencia de la basicidad del agregado sobre la adhesión y desplazamiento en presencia de agua de la interfaz asfalto-agregado.

3. Consideraciones finales

La energía superficial de asfaltos y agregados, así como los parámetros que se derivan de esta, permiten relacionar el comportamiento fisicoquímico del material con su desempeño en campo en condiciones de humedad.

En consecuencia, se encontró que seleccionando los materiales con base en su energía superficial y afinidad al agua es posible diseñar mezclas asfálticas más resistentes al daño inducido por la humedad. Lo anterior responde a que, a partir de las mediciones de energía superficial, así como de pruebas mecánicas realizadas a las mezclas, fue posible hacer diferenciaciones entre los materiales y elegir la fuente de agregado y de asfalto que se desempeña mejor bajo altos niveles de humedad.

Por lo tanto, a partir de la investigación científica generada por la Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA, se propone la propuesta adjunta, en la que se detalla el procedimiento de medición y cálculo de la energía superficial. Esto pone de manifiesto que el conocimiento generado mediante el método científico resulta de utilidad invaluable, pues permite la generación de especificaciones y criterios de selección que aseguren la calidad de los pavimentos, en concordancia con las necesidades de la sociedad costarricense.

4. Publicaciones generadas

Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., Baldi-Sevilla, A., Leiva-Villacorta, F., & Loria-Salazar, L. (2015). Effect of aging on adhesion properties of asphalt mixtures with the use of bitumen bond strength and surface energy measurement tests. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2505), 57-65.



- Aguiar-Moya, J. P., Baldi-Sevilla, A., Salazar-Delgado, J., Pacheco-Fallas, J. F., Loria-Salazar, L., Reyes-Lizcano, F., & Cely-Leal, N. (2016). Adhesive properties of asphalts and aggregates in tropical climates. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(8), 738-747.
- Baldi-Sevilla, A., Montero, M. L., Aguiar, J. P., & Loría, L. G. (2016). Influence of nanosilica and diatomite on the physicochemical and mechanical properties of binder at unaged and oxidized conditions. *Construction and Building Materials*, 127, 176-182.
- Baldi-Sevilla, A., Montero, M. L., Aguiar-Moya, J. P., Loria-Salazar, L. G., & Bhasin, A. (2017). Influence of bitumen and aggregate polarity on interfacial adhesion. *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup2), 304-317.
- Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., Vargas-Nordcbeck, A., & Loria-Salazar, L. (2017). Effect of aggregate-bitumen compatibility on moisture susceptibility of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup2), 318-328.

ANEXO 1

Propuesta de Modificación al CR-2010

LM-PI-UMP-080-R1	Fecha de emisión: 27 de mayo de 2019	Página 10 de 15
------------------	--------------------------------------	-----------------

ENERGÍA SUPERFICIAL DE ASFALTO Y AGREGADO

01 Descripción

Este trabajo consiste en cuantificar la susceptibilidad a la humedad de materiales para mezclas asfálticas con base en sus valores de energía superficial, así como en parámetros derivados de la misma. Lo anterior responde a la necesidad de la escogencia de mezclas asfálticas resistentes al deterioro causado por el agua, con el objetivo de aumentar la durabilidad de estas en presencia de humedad.

02 Material

Conforme a las siguientes Subsecciones:

Cemento asfáltico sin modificantes	702.01
Cemento asfáltico modificado	702.02
Agregado ⁽¹⁾	

(1) Piedra bruta cuyo diámetro permita realizarle cortes transversales de acuerdo a la Subsección 04

Se requerirán los siguientes disolventes: agua, etilenglicol, glicerina, formamida y diyodometano. Estos deberán seguir las especificaciones de la Norma ASTM D7490-13, detalladas en la Subsección 03.

03 Requisitos mínimos

Para poder realizar la medición de energía superficial, los disolventes deberán cumplir los requisitos mostrados en la Tabla 01.

Tabla 01. Requisitos mínimos para la medición de energía superficial

Disolvente	Grado de pureza
Agua	Grado reactivo o superior ⁽¹⁾
Etilenglicol ⁽²⁾	Grado reactivo o superior ⁽³⁾
Glicerina ⁽²⁾	Grado reactivo o superior ⁽³⁾
Formamida ⁽⁴⁾	Grado reactivo o superior ⁽³⁾
Diyodometano ⁽⁴⁾	Grado reactivo o superior ⁽³⁾

(1) De acuerdo a la norma ASTM D1193 - 06.

(2) Se deberá contar al menos con uno de estos reactivos para la medición.

(3) De acuerdo a la Norma ASTM D7490 - 13.

(4) Se deberá contar al menos con uno de estos reactivos para la medición.

04 Preparación de las muestras

Se prepararán las muestras de asfalto al verter una cantidad determinada de asfalto caliente sobre un portaobjetos de vidrio limpio y seco, tal que se cubra la superficie del vidrio en su totalidad. Se calentará el portaobjetos con el asfalto a (100 ± 5) °C hasta alcanzar homogeneidad superficial en la

película de asfalto resultante. Se deberá asegurar el recubrimiento completo del portaobjetos por la película asfalto.

Se prepararán las muestras de agregado partiendo de una piedra bruta, la cual se cortará en porciones, tipo rebanada, cuyas dimensiones deberán ser acordes al instrumento (goniómetro) a ser utilizado. Las muestras de agregado se lavarán con agua destilada y deberán colocarse dentro de un baño ultrasónico durante al menos 5 minutos. Se sacarán del baño ultrasónico y se dejarán secar en un horno a (100 ± 5) °C durante 1 hora.

05 General

Los disolventes, las muestras de película de asfalto y las muestras de agregado deberán almacenarse dentro de una desecadora. Al menos 24 horas antes de llevar a cabo la medición los disolventes y las muestras deberán mantenerse dentro de un cuarto con temperatura controlada de (20.0 ± 0.05) °C, dentro de una desecadora.

Las muestras no deberán tener defectos visibles ni deberán ser tocadas con los dedos o contaminadas de alguna otra forma.

La humedad relativa del recinto donde se llevarán a cabo las mediciones deberá ser $\geq 50\%$.

La distancia entre la punta del dispensador y la muestra no debe de exceder los 3 mm.

El valor máximo de volumen dispensado es de (20.0 ± 0.1) μL .

El tiempo entre el posicionamiento de la gota y la medición no puede exceder de los 30 s debido a que existen fenómenos de evaporación o difusión.

06 Procedimiento

La medición de Energía superficial se basa en el procedimiento descrito en las Normas ASTM D7490 - 13 y ASTM D7334 - 08(2013). A continuación, se resumen los puntos más relevantes.

- (a) Se asegurará el cumplimiento de la Subsección 05.
- (b) Se deberá nivelar la plataforma del goniómetro según las indicaciones del fabricante.
- (c) Se deberá medir el ángulo de contacto de los disolventes de la Tabla 01 (uno por vez) de acuerdo a la Norma ASTM D7334 - 08(2013). Brevemente:
 - (1) Mediante el uso de un volumen definido de líquido de prueba descritos en la Tabla 1 se extraerá una gota mediante un dispensador automático.
 - (2) Se medirá el ángulo de contacto mediante la captura de la imagen de la gota del líquido de prueba y mediante el uso del software brindado por el fabricante del equipo se analiza la misma.
 - (3) Se establecerá el horizonte de la gota y su respectivo vertical con el fin de determinar el ángulo de contacto y la simetría de la misma.

LM-PI-UMP-080-R1	Fecha de emisión: 27 de mayo de 2019	Página 12 de 15
------------------	--------------------------------------	-----------------

(d) En el caso de agregado se debe verificar que ambas caras del mismo posean la suficiente planicidad.

(e) Se considera pertinente que el agregado tenga un acabado superficial que permita la reflexión de luz con el fin de definir un horizonte que el programa del goniómetro necesita.

07 Aceptación

Las mediciones de ángulo de contacto deben seguir la tolerancia especificada por la Norma ASTM D7490.

Adicionalmente, los parámetros derivados de la energía superficial deben cumplir con el valor especificado en la Tabla 02.

Tabla 02. Valores requeridos de los parámetros derivados de la energía superficial

Parámetro	Valor
W_{AB}	$>50.0 \text{ mJ/cm}^2$
$W_{wet}^{(1)}$	$<40.0 \text{ mJ/cm}^2$
ER	>1.27
W_{AW}	$<95.0 \text{ mJ/cm}^2$
W_{BW}	$<54.0 \text{ mJ/cm}^2$

(1) Se debe considerar el valor absoluto de W_{wet} en la determinación de este límite.

ANEXO 2

Determinación de los valores límite

Los valores límite de los parámetros de adhesión (W_{AB}), desnudamiento en presencia de agua (W_{wet}), compatibilidad del asfalto y el agregado por el agua (W_{BW} y W_{AW} , respectivamente) y razón de energía (ER) fueron calculados a partir de una base de datos desarrollada por la Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA, LanammeUCR. La base de datos fue construida con más de 200 combinaciones de asfalto y agregado, calculadas a partir de los valores de energía superficial de los materiales típicos del país.

El valor límite de los parámetros W_{AB} y ER corresponde al percentil 60, mientras que para W_{wet} , W_{BW} y W_{AW} corresponde al percentil 40 de la base de datos analizada. Se considera que estos percentiles resultan adecuados en el cálculo durante esta primera aproximación, puesto que arrojan valores representativos de las muestras analizadas.

Es necesario aclarar que estos valores son calculados a partir de datos determinados con el goniómetro, cuyo procedimiento se describió en el Anexo I. Por lo tanto, aquéllos valores de energía superficial determinados con otra metodología podrían variar significativamente.