

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

---

ESTUDIO DE LA ADHESIÓN Y COHESIÓN DE TRES TIPOS DE AGREGADOS  
PÉTREOS UTILIZADOS EN BOGOTÁ-COLOMBIA CON ASFALTO 60-70

Ing. Néstor Edgardo Cely Leal



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
ÉNFASIS EN INFRAESTRUCTURA VIAL  
Bogotá D.C., 2014



---

ESTUDIO DE LA ADHESIÓN Y COHESIÓN DE TRES TIPOS DE AGREGADOS  
PÉTREOS UTILIZADOS EN BOGOTÁ-COLOMBIA CON ASFALTO 60-70

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Civil

Estudiante:

Ing. Néstor Edgardo Cely Leal

Director:

Ing. M.Sc. Ph.D. Fredy Alberto Reyes Lizcano

Asesor Temático:

Ing. M.Sc. Ana Sofía Figueroa Infante

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
ÉNFASIS EN INFRAESTRUCTURA VIAL  
Bogotá D.C., 2014



ESTUDIO DE LA ADHESIÓN Y COHESIÓN DE TRES TIPOS DE AGREGADOS  
PÉTREOS UTILIZADOS EN BOGOTÁ-COLOMBIA CON ASFALTO 60-70

Néstor Edgardo Cely Leal

La Pontificia Universidad Javeriana, no es responsable por los conceptos emitidos por los autores investigadores del presente trabajo, por lo cual son responsabilidad absoluta de sus autores y no comprometen la idoneidad de la institución ni de sus valores.



A Dios por darme la perseverancia y  
fortaleza para conseguir una meta  
más en mi vida. A mis padres porque  
sin su amor y completo apoyo no  
hubiese llegado hasta aquí.



---

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primera estancia a Dios por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente; por permitirme siempre lograr mis objetivos, GRACIAS por bendecir mi vida en todo momento.

A mis padres Gisela Leal Chiquillo y Néstor Edgardo Cely Guarín por ser los pilares fundamentales de mi vida, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores inculcados; porque sin su ejemplo, orientación y amor incondicional no sería la persona que soy hoy en día.

A mi novia Katerin Quintero por animarme, comprenderme, por apoyarme incondicionalmente, y por estar siempre presente con palabras de aliento cuando más lo necesito.

Al Ing. Fredy Reyes Lizcano, director de mi proyecto, quien ha apoyado y orientado continuamente el desarrollo de esta investigación. A la Ing. Sofía Figueroa, por compartir su experiencia, la cual ha sido fundamental guiando el proceso para concluir satisfactoriamente este proyecto.

Al Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana - Bogotá y al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica y a su personal, en especial al Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, Ing. Ellen Rodríguez Castro, Ing. José Pablo Aguiar y al Químico Jorge Salazar Delgado, por apoyar mi investigación y permitirme hacer uso de las instalaciones y equipos necesarios para cumplir mis objetivos propuestos.



---

## RESUMEN

Debido a las malas condiciones de la malla vial de la ciudad de Bogotá demostradas por el Índice de Condición del Pavimento (PCI, por sus siglas en inglés) y las constantes lluvias en la zona se pretende dar una medida cuantitativa del efecto del “stripping” y de la humedad sobre la unión del asfalto 60-70 Barrancabermeja y tres tipos de agregados pétreos. El primero de ellos es extraído de la región de Mondoñedo, occidente de la ciudad de Bogotá, El segundo agregado es extraído en el Alto La Laguna, cantera ubicada en el norte de la ciudad y el tercero es una caliza traída del Rio Coello. Estos materiales se emplean frecuentemente en la fabricación de mezclas asfálticas en esta ciudad. Así pues, el ensayo BBS y el método de la Gota Sésil se usaron para caracterizar las diferentes uniones asfalto-agregado a través de los ángulos de contacto, la humectabilidad y el trabajo adhesivo en seco y en húmedo. De este modo, se determinó que la interacción del agregado explotado en el Alto la Laguna con el asfalto presenta mejor comportamiento ante el efecto del agua, y un mayor Índice de Daño por Humedad (IDH). Se concluyó que los tres agregados estudiados se clasifican como altamente susceptibles al daño por humedad con valores de IDH menores a 0,5, por lo tanto, se recomienda que las mezclas asfálticas tengan un modificador que reduzca el efecto hidrófilo de los agregados con el agua y así evitar la inclusión de la humedad en las mezclas asfálticas.



---

## TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	10
1 PROBLEMA .....	12
1.1 TÍTULO .....	12
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	12
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	14
1.4 OBJETIVOS .....	16
1.5 SÍNTESIS.....	17
2 MARCO REFERENCIAL .....	18
2.1 MARCO TEÓRICO .....	18
2.1.1 Adherencia y Cohesión en la Unión Asfalto-Agregado.....	18
2.1.2 Teoría del Fenómeno de Adherencia.....	18
2.1.3 Mojabilidad.....	18
2.1.4 Trabajo de Cohesión.....	20
2.1.5 Trabajo de Adhesión.....	20
2.1.6 Índice de Daño por Humedad (IDH).....	21
2.1.7 Daño por Humedad.....	22
2.2 MARCO CONCEPTUAL.....	22
2.3 ANTECEDENTES.....	24
2.3.1 Energía Superficial Libre.....	24
2.3.2 Adhesión y Cohesión en Asfaltos.....	26
3 MATERIALES Y METODOLOGIA.....	27
3.1 MATERIALES .....	27
3.2 BITUMEN BOND STRENGTH TEST (ENSAYO BBS) .....	28
3.2.1 Adecuación de los materiales.....	28
3.2.2 Equipo PATTI.....	29
3.2.3 Preparación del Ensayo.....	30



3.2.3.1 Limpieza de las rocas, vidrios y tornillos. ....	30
3.2.3.2 Calentamiento de las rocas, vidrios y tornillos. ....	31
3.2.3.3 Elaboración de las gotas de asfalto. ....	31
3.2.3.5 Acondicionamiento del montaje.....	33
3.2.4 Metodología del ensayo.....	34
3.2.4.2 Ensayo BBS.....	35
3.3 ENERGIA SUPERFICIAL LIBRE Y HUMECTABILIDAD .....	36
3.3.1 Adecuación de los Materiales.....	36
3.3.2 Goniómetro. ....	37
3.3.3 Preparación del ensayo. ....	38
3.3.3.1 Limpieza de las rocas y vidrios.....	38
3.3.3.2 Secado de las rocas y vidrios.....	38
3.3.3.3 Preparación de las superficies de asfalto.....	39
3.3.3.4 Llenado de la jeringa termina. ....	39
3.3.4 Ensayo de la Gota Sésil Para el Cálculo de la Humectabilidad.....	40
3.3.4.1 Preparación del equipo.....	40
3.3.4.2 Calculo de la humectabilidad.....	41
3.3.5 Ensayo de la Gota Para el Cálculo de la Energía Superficial Libre.....	41
3.3.5.1 Preparación del equipo.....	41
3.3.5.2 Ensayo de Gota Sésil sobre Rocas y Asfalto.....	42
4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	43
4.1 BITUMEN BOND STRENGTH TEST (BBS TEST) .....	43
4.2 ENERGÍA SUPERFICIAL LIBRE Y HUMECTABILIDAD .....	47
4.2.1 Determinación de los ángulos de contacto. ....	47
4.2.2 Cálculo de las Componentes de la Energía Superficial Libre Total.....	49
4.3 Trabajo de Adhesión y Daño por Humedad .....	52
4.3.1 Trabajo de Adhesión.....	52
4.3.2 Daño por Humedad. ....	54
4.3.3 Relación del Daño por Humedad determinado con el ensayo BBS y el Trabajo Adhesivo. ....	55





5 CONCLUSIONES .....	57
6 RECOMENDACIONES.....	58
REFERENCIAS .....	59
ANEXOS .....	63



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Estado de la malla vial local de la ciudad de Bogotá D.C. (Dic., 2013)...	12
Figura 2 Acumulación y detención de agua sobre la superficie de la vía.....	13
Figura 3 Falla adhesiva y cohesiva en la interacción asfalto agregado.....	14
Figura 4 Resistencia al Stripping de agregados y aglutinantes .....	15
Figura 5 Agregados con diferentes niveles de adhesividad.....	16
Figura 6 (a) Alto ángulo de contacto, y (b) Bajo ángulo de contacto. ....	19
Figura 7 Variables de la ecuación de Young con ángulo de contacto. Subíndices $S$ , $L$ y $SL$ se refieren a sólido, líquido y sólido-líquido, respectivamente. ....	20
Figura 8 Desplazamiento de la unión del asfalto-agregado Interface por agua. ....	28
Figura 9 Superficies utilizadas como para el desarrollo de la investigación. (a) Vidrio, (b) Arenisca de Mondoñedo, (c) Arenisca del Alto la Laguna y (d) Caliza del Rio Coello.....	29
Figura 10 (a) Equipo PATTI y (b) tornillo de arranque. ....	29
Figura 11 Proceso de limpieza con cetona sobre las superficies de un vidrio .....	30
Figura 12 Limpieza ultrasónica. (a) Equipo "Cleaner", (b) Limpieza de vidrios y (c) Limpieza de rocas. Fuente: Propia, 2014.....	31
Figura 13 Proceso de calentamiento de: (a) Vidrios y (b) Rocas .....	31
Figura 14 (a) Medición del peso de la gota de asfalto y (b) gota de asfalto. ....	32
Figura 15 (a) Tornillo con gota de asfalto y (b) Montaje del tornillo con asfalto sobre la superficie. Fuente: Propia, 2014.....	33
Figura 16 (a) Condición seca en un contenedor por 24 horas y (b) Condición húmeda en baño maría por 96 horas. Fuente: Propia, 2014. ....	33
Figura 17 Software PQGold.....	34
Figura 18 (a) Proceso de calibración del equipo PATTI y (b) Línea de chequeo del proceso de calibración. Fuente: Propia, 2014.....	35
Figura 19 Huellas típicas después de realizado en ensayo BBS .....	36



Figura 20 Goniómetro, equipo usado para el ensayo de la gota sésil.....	37
Figura 21 Equipo de limpieza ultrasónica "Cleaner" del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Fuente: Propia, 2014.....	38
Figura 22 Láminas de asfalto. Fuente: Propia, 2014. ....	39
Figura 23 Líquidos de referencia: (a) Agua Desionizada, (b) Formamida y (c) Etilenglicol. ....	40
Figura 24 Calibración para medir figuras circulares.....	40
Figura 25 (a) Caída de la gota de asfalto, (b) Medición del ángulo de contacto y (c) Rocas usadas para la medición. Fuente: Propia, 2014. ....	41
Figura 26 Colocación de las Gotas de los Líquidos de Referencia sobre las Superficies de Asfalto y Rocas. Fuente: Propia, 2014.....	42
Figura 27 Ejecución del Software DROImage Advanced.....	42
Figura 28 Valores de POTS para las tres rocas en las dos condiciones.....	44
Figura 29 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado en Condición Seca. ....	45
Figura 30 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado en Condición Húmeda.	46
Figura 31 Índice de Daño por Humedad (IDH) de las diferentes Uniones Asfalto-agregado.....	56



---

## ÍNDICES DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1 Modo de falla de la Unión Asfalto-agregado para cada condicionamiento. .....	43
Tabla 2 Resumen Ángulos de Contacto Promedio con el Ensayo Gota Sésil (Asfalto) .....	47
Tabla 3 Resumen Ángulos de Contacto Promedio con el Ensayo Gota Sésil (Formamida). Ver Anexos 10, 11, 12 y 13.....	48
Tabla 4 Resumen Ángulos de Contacto Promedio con el Ensayo Gota Sésil (Etilenglicol). Ver Anexos 14, 15, 16 y 17.....	48
Tabla 5 Resumen Ángulos de Contacto Promedio con el Ensayo Gota Sésil (Agua Desionizada). Ver Anexos 18, 19, 20 y 21. ....	48
Tabla 6 Componentes de la Energía Superficial Libre de los Líquidos de Prueba a 20°C. ....	49
Tabla 7 Resumen Energía Superficial Libre Total (ergs/cm <sup>2</sup> ) y sus Componentes .....	51



---

## ÍNDICES DE ANEXOS

	Pag.
Anexo 1 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado del Agregado 1 (Arenisca) obtenido de la zona de Mondoñedo en Condición Seca.....	64
Anexo 2 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado del Agregado 2 (Arenisca) obtenido de la zona del Alto la Laguna en Condición Seca.....	65
Anexo 3 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado del Agregado 3 (Caliza) obtenido del Rio Coello en Condición Seca. ....	66
Anexo 4 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado del Agregado 1 (Arenisca) obtenido de la zona de Mondoñedo en Condición Húmeda. ....	67
Anexo 5 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado del Agregado 2 (Arenisca) obtenido de la zona del Alto la Laguna en Condición Húmeda. ....	68
Anexo 6 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado del Agregado 3 (Caliza) obtenido del Rio Coello en Condición Húmeda.....	69
Anexo 7 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Asfalto sobre Agregado 1 (Mondoñedo).....	70
Anexo 8 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Asfalto sobre Agregado 2 (Alto la Laguna) .....	72
Anexo 9 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Asfalto sobre Agregado 3 (Rio Coello).....	74
Anexo 10 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Formamida sobre Asfalto....	77
Anexo 11 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Formamida sobre Agregado 1 (Mondoñedo).....	77
Anexo 12 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Formamida sobre Agregado 2 (Alto la Laguna).....	78
Anexo 13 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Formamida sobre Agregado 3 (Rio Coello) .....	78
Anexo 14 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Etilenglicol sobre Asfalto.....	79



---

Anexo 15 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Etilenglicol sobre Agregado 1 (Mondoñedo).....	79
Anexo 16 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Etilenglicol sobre Agregado 2 (Alto la Laguna).....	80
Anexo 17 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Etilenglicol sobre Agregado 3 (Rio Coello) .....	80
Anexo 18 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Agua Desionizada sobre Asfalto .....	81
Anexo 19 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Agua Desionizada sobre Agregado 1 (Mondoñedo).....	82
Anexo 20 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Agua Desionizada sobre Agregado 2 (Alto la Laguna).....	83
Anexo 21 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Agua Desionizada sobre Agregado 3 (Rio Coello) .....	84
Anexo 22 Ejemplo de Rutina de Cálculo de las Componentes Polar y Apolar y de la Energía Superficial Libre Total .....	84

## INTRODUCCIÓN

El asfalto constituye uno de los materiales más usados en el área de la ingeniería vial; debido a que aporta economía y versatilidad en dicho campo, por lo que gran parte de las vías de la ciudad de Bogotá están construidas con carpetas asfálticas. No obstante, las condiciones climáticas de la región inciden en el deterioro de las mezclas y afectan la unión del asfalto-agregado generando separación del ligante y el agregado.

Ishai y Craus (1977), estudiando los micro-mecanismos de daño por humedad de las mezclas asfálticas introdujeron la teoría de Energía Superficial como un tercer mecanismo, además de la teoría química y mecánica, para explicar la adhesión. Así mismo lo definieron como el método más potente de evaluación de la adhesión entre el asfalto y el agregado.

En las últimas décadas se han desarrollado nuevas metodologías que estudian los modelos micro-mecánicos de fractura para identificar e investigar las causas y el desarrollo de los efectos del agua en mezclas asfálticas (Caro-Spinel, Masad, Bhasin, & Little, 2008).

No obstante, en Colombia la investigación de la Energía Superficial Libre (ESL) es bastante novedosa. De hecho, Caro-Spinel y Alvarez-Lugo (2009) realizaron mediciones de ESL en la interfaz asfalto-agregado en laboratorio usando asfaltos colombianos y agregados de origen colombiano y norteamericano. Siendo este, el primer avance en el país con la intención de evaluar cuantitativamente la calidad de la adhesión, la susceptibilidad al daño por humedad y la humectabilidad de diversos sistemas asfalto-agregado de origen nacional.

Adicionalmente al cálculo de la ESL, se pretende entender el comportamiento y el modo de falla las mezclas asfálticas al entrar en contacto con el agua. Mediante el



análisis de la humectabilidad y la determinación del trabajo adhesivo basado en la teoría termodinámica. Así mismo, con la medición directa de la fuerza de arranque

De esta manera la investigación tiene como objetivo principal determinar el mejor comportamiento adhesivo de los tres tipos de agregados petreos usados en la región con el asfalto 60-70 Barranca.



## 1 PROBLEMA

### 1.1 TÍTULO

Estudio de la Adhesión y Cohesión de Tres Tipos de Agregados Pétreos Utilizados en Bogotá-Colombia con Asfalto 60-70.

### 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para el año 2013, se diagnosticó el estado de la malla vial de Bogotá con el Índice de Condición del Pavimento (PCI por sus siglas en inglés), parámetro que permite calificar la condición superficial de la estructura del pavimento. Este Índice se basa en los resultados de un estudio visual de la condición del pavimento, en el que se identifican la clase, la extensión y la severidad del daño que se presenta.

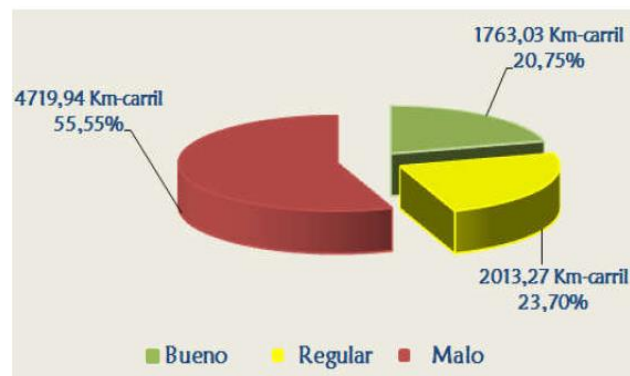


Figura 1. Estado de la malla vial local de la ciudad de Bogotá D.C. (Dic., 2013)  
Fuente:(IDU, 2014).

Como se puede ver en la Figura 1, las condiciones de la malla vial de la ciudad de Bogotá presentan en un 63%, de su longitud total, de malas a regulares condiciones de movilidad, de acuerdo al índice PCI. De ahí que, Villegas Flores et al. (2014) reflejan que el 94.5% de los deterioros encontrados en los pavimentos en la ciudad de Bogotá están asociados principalmente al comportamiento frágil que experimentan mezclas asfálticas sometidas a climas de bajas temperaturas. Lo

anterior induce a pensar que, en un clima como el de la ciudad de Bogotá D.C., en las mezclas asfálticas se generan principalmente fallas por fatiga, generando fallas cohesivas y adhesivas dentro de la estructura del pavimento. Especialmente en vías con escaso mantenimiento superficial en donde el daño por humedad (ver Figura 2) y fenómenos como el “stripping” se hacen evidentes (Villegas Flores et al., 2014).

El fenómeno anteriormente nombrado tiene como efecto la separación del ligante asfáltico de los agregados pétreos debido a la pérdida de adherencia y cohesión de la interface asfalto-agregado (Caro-Spindel & Alvarez-Lugo, 2011; Kassem, Masad, Lytton, & Bulut, 2009; Kyatham & Khattak, 2008; Mallick, Pelland II, & Hugo, 2005; Rondón-Quintana & Moreno-Anselmi, 2010).



Figura 2 Acumulación y detención de agua sobre la superficie de la vía.  
Fuente: Propia, 2013

En términos generales se sabe que el agua ingresa en las capas del concreto asfáltico, este interactúa con los agregados de la mezcla y se produce la degradación del concreto asfáltico, motivada principalmente por la tensión superficial generada entre ellos; este problema se puede caracterizar determinando si la falla en el interior de la mezcla asfáltica se debe a problemas cohesivos del ligante, o a la pérdida de adhesión entre el asfalto y el agregado. El proceso descrito anteriormente puede conducir a fallas particulares en una mezcla en servicio, como son: disgregación, baches, fisuración y reducción de su respuesta mecánica, y

consecuentemente la pérdida de funcionalidad (Rondón-Quintana y Moreno-Anselmi. 2010).

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

Con ésta investigación se pretende contribuir a la solución de una parte del problema general conocido como “stripping” y el efecto del agua como agente externo, determinando el modo de falla de la interface asfalto-agregado de los concretos asfálticos usados típicamente en la ciudad de Bogotá en estado seco y condicionando su desempeño humedeciéndolo. La Figura 3 muestra los diferentes modos de falla ocasionados por la pérdida de adhesión y cohesión en la interface asfalto-agregado, la Figura 3a muestra la falla adhesiva, esta se debe al rompimiento de la unión entre el agregado y el ligante asfáltico ocasionando el desprendimiento de los agregados pétreos, la Figura 3b indica que la unión asfalto-agregado es mucho más resistente a los agentes externos que las fuerzas cohesivas internas del asfalto, lugar donde se genera el rompimiento, por lo que se conoce como falla cohesiva y por último, la Figura 3c es una mezcla de los dos modos de falla anteriormente descritos, donde se presenta rompimiento de cohesión interna del asfalto y separación de los agregados pétreos del ligante asfáltico.



Figura 3 Falta adhesiva y cohesiva en la interacción asfalto agregado  
Fuente: Gutiérrez-Muñiz, 2008

Anteriormente en el país el tema de adhesión y cohesión de las mezclas asfálticas solo se sometía a ensayos de carácter cualitativo. Por ejemplo el INV E 740 (Figura 4), el cual es usado para valorar la adherencia de los agregados para la construcción de tratamientos superficiales. De igual forma, el INV E-737 es empleado para valorar la afinidad con el asfalto de los agregados para mezclas en caliente (Figura 5). Según lo descrito anteriormente, las metodologías INVIAS mencionadas, son una forma de visualizar la calidad de la unión asfalto-agregado, pero no de determinar cuantitativamente dicho carácter, ni se da un margen sobre estructuralmente que tipo de agregado presenta mejor comportamiento. Por lo tanto, es de suma importancia comparar numéricamente el comportamiento de la interacción asfalto-agregado y así determinar el mejor comportamiento adhesivo y cohesivo de las diferentes uniones asfalto-agregado como se realizó en la investigación de Figueroa y compañía (2013), donde se estimó la susceptibilidad a la humedad de agregados y asfaltos colombianos.



Figura 4 Resistencia al Stripping de agregados y aglutinantes  
Fuente: Gutiérrez-Muñiz, 2008

Al momento de determinar el efecto adhesivo y cohesivo se trabajó con un método de ensayo simple y directo para medir la resistencia de la unión en la interface asfalto-agregado, el cual además, es utilizado para evaluar la sensibilidad de las mezclas asfálticas a la humedad. Este método es repetible, fiable, y práctico basado en el ensayo BBS a través del equipo PATTI (Canestrari, Cardone, Graziani,

Santagata, & Bahia, 2010), y con el método de la Gota Sésil a través del Goniómetro para medir tensión superficial.



Figura 5 Agregados con diferentes niveles de adhesividad.  
Fuente: Sanchez Sabogal (1982)

El ensayo de la de la Gota Sésil es generalmente usado en pinturas y otro tipo de líquidos; estos ensayos son novedosos en Colombia porque reportan resultados cuantitativos, numéricamente medibles y comparables, y no solo muestran condiciones cualitativamente medibles. Además de entender los mecanismos de daño se pretendió evaluar la correcta combinación de materiales que dan mayor estabilidad y son más resistentes a la humedad. Para estudiar la atracción entre el asfalto-agregado y el efecto del agua se utilizó la teoría termodinámica a través del cálculo de la energía superficial libre y el trabajo adhesivo en la interfaz de la unión de los materiales como indicador de las características superficiales de la unión asfalto-agregado.

#### 1.4 OBJETIVOS

El objetivo general de la investigación es determinar el mejor comportamiento de adhesión para los tres tipos de agregados pétreos usualmente utilizados en las mezclas asfálticas para Bogotá con asfalto 60-70 Barranca, en estado seco y húmedo.



Los objetivos específicos en los que se enfoca el desarrollo de este documento son:

- Medir el comportamiento adhesivo y cohesivo de la interacción entre el asfalto 60-70 Barranca, con tres tipos de agregados usando el ensayo PATTI, en condiciones secas y húmedas.
- Establecer el comportamiento de humectabilidad y energía superficial libre del asfalto 60-70 con los agregados pétreos analizados.
- Determinar el mejor comportamiento adhesivo del conjunto asfalto y agregado en condiciones secas y húmedas.

## 1.5 SÍNTESIS

En el Capítulo 2 se presentan los fundamentos conceptuales y teóricos que dan base para el desarrollo de esta investigación, tales como son los conceptos teóricos de adherencia y sus tipos, así como la mojabilidad y el trabajo de cohesión. En el Capítulo 3 se muestra una descripción de los materiales usados, además de describir la metodología aplicada para la ejecución de los diferentes ensayos ejecutados, tanto como el cálculo de la Energía Superficial Libre y la afectación de la unión asfalto agregado debido al efecto de la humedad. El Capítulo 4 muestra los resultados obtenidos en esta investigación, así como la interpretación y análisis con respecto a lo reportado en la literatura. El Capítulo 5 presenta las conclusiones obtenidas tras el desarrollo de esta investigación, enfatizando en la ESL de nuestros materiales comparados con otros agregados de similares características pero de diferentes países. En el Capítulo 6 se muestran las referencias bibliográficas utilizadas.



## 2 MARCO REFERENCIAL

### 2.1 MARCO TEÓRICO

**2.1.1 Adherencia y Cohesión en la Unión Asfalto-Agregado.** La adherencia es una propiedad que se presenta al momento de efectuarse la interacción entre un material ligante y otro material. Pero su comportamiento no es constante en el tiempo, el primer momento recibe el nombre de adherencia activa, la cual es el mojado del agregado por parte del ligante asfáltico (Gutiérrez-Muñiz, 2008). Esto quiere decir que es la capacidad del asfalto para realizar un buen recubrimiento al agregado durante el proceso de mezclado (Carrillo M. & Gamboa R., 2007). El segundo momento es la adherencia pasiva, esta propiedad es la resistencia que presenta el ligante asfáltico, una vez recubierto el agregado, frente a la acción del agua en combinación con el tránsito. Esto significa que es la resistencia que presenta el ligante ante la acción de desplazamiento cuando se presentan los factores anteriormente mencionados (Montes & Paez, 2010).

**2.1.2 Teoría del Fenómeno de Adherencia.** La teoría de adsorción termodinámica es la teoría más ampliamente aplicada en la adhesión interfacial. Esta teoría se basa en el concepto de que un adhesivo se adhiere a un sustrato debido a las fuerzas físicas establecidas en la interfaz, siempre y cuando se logra contacto. La magnitud de estas fuerzas generalmente puede estar relacionado con cantidades termodinámicas fundamentales, tales como las energías libres superficiales de los materiales implicados en la unión adhesiva (Pocius, 2002).

**2.1.3 Mojabilidad.** La teoría de adsorción termodinámica afirma que la adhesión se produce en condiciones de suficiente humectación. Por lo tanto, en la interfaz de la superficie de líquido-sólido, si las moléculas del líquido tienen una atracción más fuerte a las moléculas de la superficie sólida que entre sí (es decir, las fuerzas adhesivas son más fuertes que las fuerzas de cohesión), la humectación de la



superficie sólida se produce. Alternativamente, si las fuerzas de cohesión son más fuertes que el adhesivo obliga al líquido forma una gota y no moja la superficie del sólido.

Un método para cuantificar las características de humectación de la superficie de un líquido es medir el ángulo de contacto ( $\theta$ ) de una gota de líquido colocada sobre la superficie de un sólido. Un ángulo de contacto cero también podría llamarse perfecto mojado y por lo tanto la difusión espontánea. Si  $\theta < 90^\circ$  se dice que el líquido moja el sólido, y esta condición refleja una buena humectación y adhesividad. Si  $\theta > 90^\circ$  se dice que el líquido no moja la superficie, y esta condición resulta en humectación y adhesividad pobre. Por lo tanto, una superficie de baja humectación proporcionaría un alto ángulo de contacto (Figura 6a), en tanto que una superficie de alta humectación proporcionaría un bajo ángulo de contacto (Figura 6b).

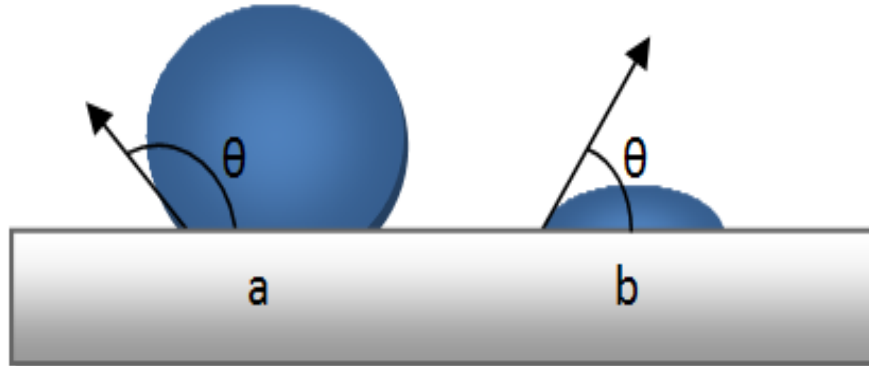


Figura 6 (a) Alto ángulo de contacto, y (b) Bajo ángulo de contacto.  
Adaptado de: Moraes (2011)

En consecuencia, el ángulo de contacto es un parámetro importante en los procesos de humectación y su medición permite la evaluación de sólido energía libre superficial. Buena humectación requiere que el adhesivo tiene una energía superficial más baja que el sustrato. La relación entre las tensiones superficiales de la interface sólido, líquido sólido-líquido, y el ángulo de contacto se expresó como la ecuación de Young (Schrader, 1995; Young, 1805):



$$\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_L * \cos\theta \quad (2-1)$$

Donde  $\gamma_S$  está la energía de superficie sólida,  $\gamma_{SL}$  es la energía interfacial sólido-líquido,  $\gamma_L$  es la energía de la superficie del líquido, y  $\theta$  es el ángulo de contacto (Figura 7).

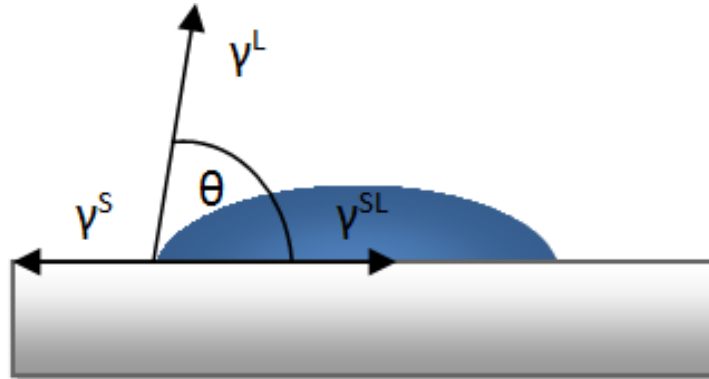


Figura 7 Variables de la ecuación de Young con ángulo de contacto. Subíndices *S*, *L* y *SL* se refieren a sólido, líquido y sólido-líquido, respectivamente.

Adaptado de: Moraes (2011)

**2.1.4 Trabajo de Cohesión.** Cohesión explica la atracción intermolecular entre moléculas similares. La naturaleza cohesiva de un material líquido o sólido implica la separación del líquido o sólido a partir de sí mismo. Por lo tanto, el trabajo de la cohesión ( $W_C$ ) se define como dos veces la Energía Superficial ( $\gamma$ ) y se describe en la Ecuación 2-2:

$$W_C = 2 * \gamma \quad (2-2)$$

**2.1.5 Trabajo de Adhesión.** El trabajo de adherencia es una propiedad intrínseca-dependiente del par de líquido-sólido. Por lo tanto, la definición de trabajo de adhesión se desprende directamente de la definición de la energía libre interfacial y se expresa por la ecuación de Dupré (Dupré & Dupré, 1869):

$$W_{SL} = \gamma_S + \gamma_L + \gamma_{SL} = W_a \quad (2-3)$$



Dónde  $W_a$  está el trabajo de adhesión,  $W_{SL}$  es el trabajo necesario para separar el sólido de la superficie del líquido,  $\gamma_S$  es la energía de superficie sólida,  $\gamma_L$  es la energía de la superficie del líquido, y  $\gamma_{SL}$  es la energía interfacial sólido-líquida, descrita por la ecuación 2-4:

$$\gamma_{SL} = \left( \sqrt{\gamma_S^{LW}} - \sqrt{\gamma_L^{LW}} \right)^2 + 2 * \left( \sqrt{\gamma_S^+ * \gamma_S^-} + \sqrt{\gamma_L^+ * \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_S^+ * \gamma_L^-} + \sqrt{\gamma_S^- * \gamma_L^+} \right) \quad (2-4)$$

Donde  $\gamma^{LW}$  es la de Van der Waals componente de energía de superficie apolar o Van Lifshitz,  $\gamma^+$  es el parámetro de ácido de Lewis de la energía superficial, y  $\gamma^-$  es el parámetro de base de Lewis de la energía superficial. Subíndices S y L se refieren a sólidos y líquidos, respectivamente.

La relación entre el ángulo de contacto y la energía libre de la superficie puede escribirse como la ecuación de Young-Dupré, combinando las ecuaciones 2-1 y 2-3:

$$W_a = \gamma_L * (1 + \cos\theta) \quad (2-5)$$

El trabajo adhesivo puede ser reescrito combinando las ecuaciones 2-3, 2-4, 2-5 con la relación mostrada en la ecuación 2-1:

$$W_a = \gamma_L * (1 + \cos\theta) = 2 * \sqrt{\gamma_S^{LW} * \gamma_L^{LW}} + 2 * \sqrt{\gamma_S^+ * \gamma_L^-} + 2 * \sqrt{\gamma_S^- * \gamma_L^+} \quad (2-6)$$

**2.1.6 Índice de Daño por Humedad (IDH).** Es un índice de daño que clasifica la afectación de la humedad sobre la unión Asfalto-agregado, está basado en la relación del trabajo de adhesión seco y el trabajo de adhesión húmedo, y mide la susceptibilidad al deterioro por humedad de mezclas asfálticas. La ecuación (2-7) define este valor, denominado en este estudio Índice de Daño por Humedad (Bhasin, Masad, Little, & Lytton, 2006).



$$IDH = \frac{W_{LS}^{Seco}}{|W_{LS}^{Humedo}|} \quad (2-7)$$

**2.1.7 Daño por Humedad.** El ensayo de Resistencia de la Unión del Asfalto (BBS test por sus siglas en inglés), se utilizó para evaluar la resistencia a la tracción de desprendimiento de la unión de Asfalto-agregado. Como lo ratificó Moraes, Velasquez, & Bahia (2011b) este procedimiento es altamente confiable y práctico para la determinación de los daños por humedad, y para evaluar cuantitativamente la unión adhesiva entre el asfalto y el agregado. Además, sus resultados indicaron que la prueba BBS es repetible y reproducible. La resistencia a la tracción de desprendimiento (POTS por sus siglas en inglés) se calcula de la siguiente manera:

$$POTS = \frac{(BP * Ag) - C}{Aps} \quad (2-8)$$

Donde, Ag es el área de la huella de asfalto residual sobre la superficie ensayada (mm<sup>2</sup>), BP es la presión de arranque mostrada por el equipo (kPa), Aps es el área del tornillo de arranque (mm<sup>2</sup>), y C es la constante de pistón.

## 2.2 MARCO CONCEPTUAL

**Adhesión Asfalto–Agregado:** La adhesión es una fuerza de fricción que se desarrolla en el interfaz de dos cuerpos de diferente material y se opone al movimiento relativo de los cuerpos (Garcés G. & García A., 2002).

**Ángulo de Contacto:** Es el ángulo interior formado entre una gota y el sustrato. Es una tangente trazada en la intersección entre la gota y el sustrato (ASTM D907–12a, 2012).



**Cohesión:** Es la habilidad de un material asfáltico para mantener firmemente unidas las partículas de agregados, después de que la mezcla ha sido compactada y se ha enfriado a la temperatura ambiente (A. Bhasin & Little, 2007).

**Condición de Superficie Seca Saturada:** En esta condición, los poros saturables del agregado se llenan con la humedad, mientras que el área de la superficie principal de las partículas de agregado permanece seca (AASHTO TP-91, 2011).

**Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas:** Se puede definir como el deterioro de la capacidad estructural de la mezcla causada por la presencia de agua en estado líquido o gaseoso al interior de su microestructura (Rondón-Quintana & Moreno-Anselmi, 2010).

**Energía Superficial Libre (ESL):** Es una medida de un efecto que surge de fuerzas de cohesión moleculares balanceadas en una superficie que hacen que la superficie se contraiga y se comportan como una película o membrana. El exceso de energía libre es lo que llamamos energía superficial, que tiene unidades de energía / unidad de área como joules / cm<sup>2</sup>. (ASTM D7334, 2013).

**Humectabilidad:** Propiedad de un líquido para adherirse a una superficie en forma de hoja, o para ser absorbida por esa superficie o ambos. El humectante o comportamiento de absorción entre un líquido y un sustrato en forma de hoja depende, al menos en parte, de la relación de la energía superficial (tensión) del líquido y la energía superficial del sustrato (AASHTO TP-91, 2011).

**Modo de Falla:** Indicador del componente más débil del sistema asfalto / superficie. En las aplicaciones a esta prueba puede producir insuficiencia procedimiento en tres lugares: en el cemento asfáltico, en la interfaz del asfalto / superficie, o en un modo mixto (AASHTO TP-91, 2011).



**Reflexión:** Corresponde a una imagen reflejada simétricamente de sí mismo (AASHTO TP-91, 2011).

**Resistencia a la Tracción de Arranque:** Presión necesaria para arrancar un tornillo unido a la superficie por el ligante asfáltico, a través de una fuerza aplicada en la dirección normal. Se utiliza en este procedimiento como parámetro para evaluar la calidad de la unión (AASHTO TP-91, 2011).

**Stripping:** Es la separación del agregado pétreo del ligante asfáltico debido a la presencia de agua en la mezcla asfáltica, debido a la disminución en resistencia de la unión (Rondón-Quintana & Moreno-Anselmi, 2010).

**Superficie de contacto:** Superficie donde se coloca el líquido con el fin de medir el ángulo de contacto. (AASHTO TP-91, 2011).

**Tensión superficial:** La fuerza necesaria para romper una película de una longitud dada, por lo general en dinas / cm o Newtons / m. (ASTM D7334, 2013).

## 2.3 ANTECEDENTES

**2.3.1 Energía Superficial Libre.** La medición de la energía superficial libre de asfaltos y agregados es una herramienta eficiente para evaluar la compatibilidad y el desempeño de diversos sistemas asfalto-agregado, los autores Alvarez y Ovalles (2012) realizaron esta medición para ligantes asfálticos a partir del método de placa de Wilhelmy, donde a través de la metodología de la gota sésil se evaluó la tensión interfacial, la gravedad de gotas y la humectabilidad de la superficie sólida, con el fin de permitir adentrarse en el análisis de las propiedades de las fases constitutivas de la mezcla asfáltica, y de este modo, entender más claramente la forma como estas fases interactúan y así, seleccionar los materiales más convenientes para el diseño y fabricación de una mezcla asfáltica. En este sentido, la medición de la



energía superficial libre de agregados pétreos puede ser cuantificada empleando el método mejorado propuesto por Bhasin y Little, basado en la teoría termodinámica de la adhesión en concretos asfálticos (Caro-Spínel & Alvarez-Lugo, 2011). De lo anteriormente dicho, Alvarez y compañía (2012) en su estudio obtuvieron después de la caracterización de varias mezclas asfálticas con agregados pétreos de Estados Unidos y de Colombia con asfalto Colombiano, donde a través del Índice de Daño por Humedad para mezclas, se concluyó que no se puede especificar un cemento asfáltico que de mejores condiciones de adhesión debido a que el comportamiento de las mezclas de asfaltos colombianos con agregados colombianos presentaron valores muy parecidos.

Un antecedente que enfoca el estudio de adhesión y cohesión basados en la energía superficial libre es el realizado por Tan & Guo (2013) donde, se da la premisa de que el asfalto sin modificar tiene más energía superficial libre que el asfalto modificado, y las fuerzas de dispersión en el asfalto sin modificar son más altas, debido que sus fuerzas intermoleculares son mayores. Otro resultado del estudio de Tan & Guo (2013) muestra claramente como la humedad hace que disminuya la adhesión en las mezclas asfálticas afectando directamente el llenante mineral, y particularmente demuestra que el llenante de la piedra caliza es la más sensible a la humedad.

Particularizando los diferentes agregados Wei, Xu, Shaopeng, & Jizhe (2011) encontraron que a medida que el contenido de Oxido de Silicio ( $\text{SiO}_2$ ) es mayor, efecto que hace a los agregados ácidos, la adherencia con el asfalto disminuye, esto se determinó a través del ensayo de ángulo de contacto evaluando las características adhesivas entre agregados y asfalto. Además, corroboraron que al adicionar cal hidratada a dichas mezclas asfálticas, el efecto del stripping disminuye en comparación con las mezclas sin aditivos.



**2.3.2 Adhesión y Cohesión en Asfaltos.** La adhesión y la cohesión en las mezclas asfálticas varía en la medida en que la temperatura disminuye, un estudio de Chuanfeng, Chuanjing, Dajun, Zhenfeng, & Shi (2014) demostró que en estado húmedo la falla por adhesión en las mezclas asfálticas, sin importar el tipo de asfalto, son mayores a temperaturas bajas ( $0^{\circ}\text{C}$ ) y que existe un comportamiento muy similar entre los  $10^{\circ}\text{C}$  y los  $30^{\circ}\text{C}$ , y depende del espesor de la película de asfalto, aunque, estudiando la cohesión de los diferentes asfaltos, se determinó que esta propiedad disminuye, sin importar el espesor de la película de asfalto, sino al disminuir la temperatura.

Los dos modos de falla a estudiar se muestran en la superficie de contacto, la falla cohesiva muestra separación en película de asfalto, mientras que la falla adhesiva deja al descubierto el agregado al haber separación de la unión asfalto-agregado concluyendo que la fuerza de adhesión entre el agregado y el asfalto ha significado de gran influencia en el rendimiento macroscópico de la mezcla de pavimento y que el agua reduce la adhesión y efectos de cohesión. (Chuanfeng et al., 2014)



### 3 MATERIALES Y METODOLOGIA

#### 3.1 MATERIALES

El cemento asfáltico utilizado en la investigación corresponde al producido en las refinerías de Barrancabermeja por Ecopetrol S.A que según la referencia internacional es un ASTM D 1437 lo cual garantiza una penetración mínima/máxima de 60/70 (0,1 mm) a 25°C de 60-70. Esta muestra se obtuvo de la planta de mezclado de la compañía ICEIN S.A. (Mosquera, Cundinamarca).

De igual manera, se buscaron los agregados más comúnmente usados en mezclas asfálticas en la ciudad de Bogotá. Para esta investigación se usaron 3 tipos de agregados, las características básicas e iniciales de los agregados es que deben tener un tamaño comprendido entre 5" y 20" y debe ser un material sano, sin fisuras visibles, que nos garantice cortes de roca lisos y homogéneos. Los dos primeros vienen de zonas de explotación a cielo abierto, el primer agregado utilizado fue extraído de la zona de Mondoñedo, este tipo de material es una arenisca de color amarillo claro brillante, con una densidad aparente de 2,46 y una absorción del 3,36%, el segundo agregado utilizado fue extraído del Alto la Laguna, este material es también una arenisca pero de color amarillo con tonalidades grises que lo muestran obscuro, con una densidad aparente de 2,43 y una absorción del 3,33%, por último se utilizó material del río Coello, este tipo de material es totalmente diferente a los mencionados anteriormente, es una caliza de color gris de origen aluvial con valores de densidad aparente de 2,74 y absorción de 0,36%.

Por último, los solventes utilizados para el proceso de limpieza de los materiales para los ensayos necesarios en el desarrollo de la investigación fueron varsol (utilizado normalmente en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana) y cetona (exclusivo para la limpieza de las rocas y vidrios).



### 3.2 BITUMEN BOND STRENGTH TEST (ENSAYO BBS)

El ensayo BBS, tomado como guía según la norma AASHTO TP-91 (2011) permite evaluar cuantitativamente la adhesión entre el asfalto y el agregado o las fuerzas cohesivas internas del asfalto, dependiendo del modo de falla de la unión asfalto-agregado. El objetivo de este ensayo es la cuantificación de la afectación de la humedad sobre la interface de los dos materiales, este fenómeno ocurre debido a la acción del agua que se hace hueco entre la interacción de los dos materiales desplazando las partículas de asfalto a medida que aumenta la exposición de la mezcla al agua como se ve en la Figura 8. La principal ventaja del ensayo BBS es que se ha podido comprobar su simplicidad, rapidez y repetitividad (Moraes, Bahia, & Velasquez, 2011a).

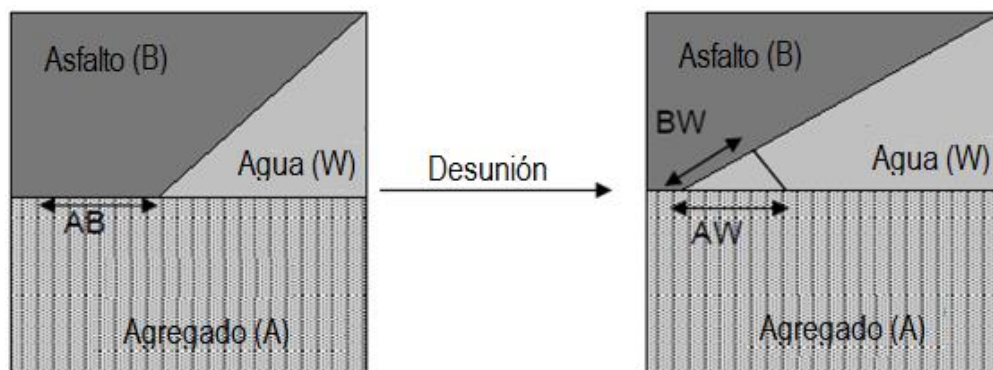


Figura 8 Desplazamiento de la unión del asfalto-agregado Interface por agua.  
Fuente: Bhasin & Little, 2007.

**3.2.1 Adecuación de los materiales.** Para el ensayo BBS se utilizaron cuatro tipos de superficies, la primera y ampliamente usada fue el vidrio (Figura 9a), esta superficie se utilizó como superficie de referencia, debido a lo novedoso de este ensayo en Colombia, para comprobar la repetitividad y agilidad del método. Con esta superficie llegaron a realizarse hasta 50 puntos de prueba en ambas condiciones (el acondicionamiento de la superficie se explicara en el numeral 3.2.3 Metodología del Ensayo) aparte de los 25 puntos por condición necesarios para darle sustento estadístico a los datos adquiridos.

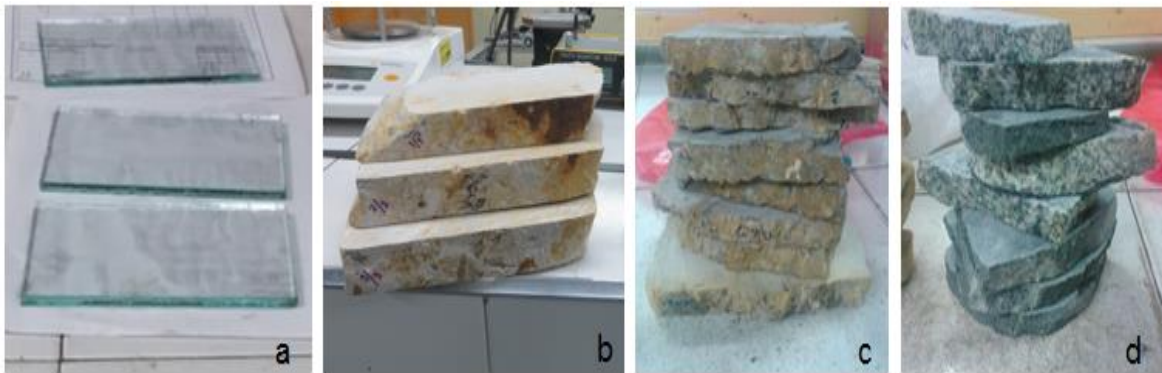


Figura 9 Superficies utilizadas como para el desarrollo de la investigación. (a) Vidrio, (b) Arenisca de Mondoñedo, (c) Arenisca del Alto la Laguna y (d) Caliza del Rio Coello.  
Fuente: Propia, 2014.

Las siguientes tres superficies se cortaron de las rocas mencionadas anteriormente (Figura 9b, 9c, 9d), en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana, para aceptar los cortes de las rocas se tuvo como requisito que cada muestra tuviera una pulgada de espesor, y ambas caras debían ser lo más paralelas posibles, sin estrías y totalmente lisas, para de este modo garantizar que las superficies en apoyo fueran totalmente planas y horizontales.

**3.2.2 Equipo PATTI.** El equipo utilizado para realizar el ensayo BBS es el equipo PATTI, este equipo está compuesto como lo explica Moraes, Bahia, & Velasquez (2011a) por un medidor neumático, mangueras de presión, pistón, placa de reacción y un pull-out stub (tornillo de arranque) como se puede observar en la Figura 10.

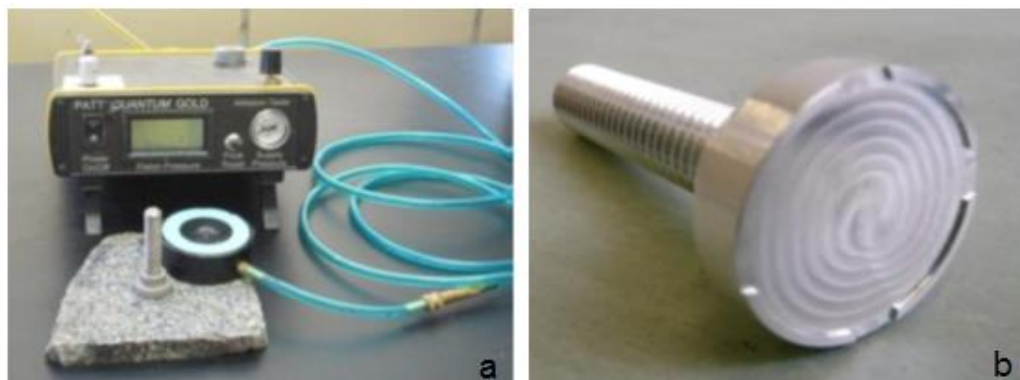


Figura 10 (a) Equipo PATTI y (b) tornillo de arranque.  
Fuente: (Moraes et al., 2011a)

### 3.2.3 Preparación del Ensayo.

3.2.3.1 Limpieza de las rocas, vidrios y tornillos. Al momento de realizar el proceso de limpieza se debe tener en cuenta el tiempo al que es sometida cada superficie al contacto directo con los solventes, ya que al permanecer mucho tiempo puede dificultar la extracción y purificación intermolecular debido al grado de absorción de la roca. Sabiendo lo anterior, la limpieza de las rocas y vidrios empieza humedeciendo con abundante varsol y limpiando con estopa de algodón (o tela) la superficie hasta quedar superficialmente seco, después se usa la tela, para evitar el desprendimiento de cualquier impureza, humedecida con cetona para limpiar las caras de las rocas y vidrios como se puede observar en la Figura 11. De esta manera se limpia superficialmente cualquier rastro de polvo, impurezas y asfalto, cabe denotar que cada superficie de la roca puede usarse hasta 5 veces dependiendo del grado de limpieza de la huella dejada por el asfalto en los ensayos realizados anteriormente.



Figura 11 Proceso de limpieza con cetona sobre las superficies de un vidrio  
Fuente: Propia, 2014.

Paso seguido se llena el equipo de limpieza ultrasónica “Cleaner” (Figura 12) con agua destilada (se trabaja con agua destilada y no con agua normal para evitar que está venga con impurezas minerales u orgánicas) y se colocan en el interior las rocas y vidrios. El proceso de limpieza debe programarse en el Cleaner a una temperatura de 60°C por 60 minutos.

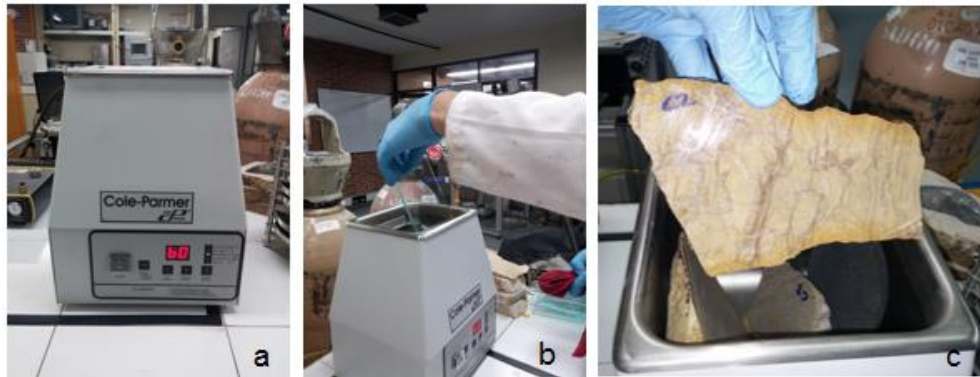


Figura 12 Limpieza ultrasónica. (a) Equipo "Cleaner", (b) Limpieza de vidrios y (c) Limpieza de rocas. Fuente: Propia, 2014.

Las tornillos o tornillos se deben limpiar con abundante varsol para evitar que queden impurezas sobre todo en la cara biselada que es la que entra en contacto directo con el asfalto.

3.2.3.2 Calentamiento de las rocas, vidrios y tornillos. Después de terminada la limpieza de las rocas, vidrios y tornillos; estas deben introducirse al horno a una temperatura de 60°C durante 60 minutos. Se recomienda colocar los elementos sobre una superficie limpia (ver Figura 13). Este paso es inmediatamente anterior de la realización del montaje.

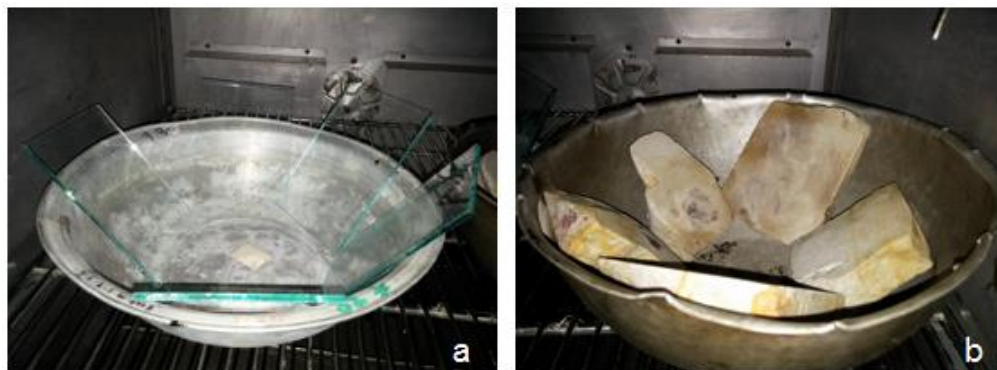


Figura 13 Proceso de calentamiento de: (a) Vidrios y (b) Rocas  
Fuente: Propia, 2014.

3.2.3.3 Elaboración de las gotas de asfalto. Este proceso debe realizarse con limpieza y precisión. Iniciando con el calentamiento del asfalto a 150°C por 60 minutos, esta temperatura facilita una fluidez total, permitiendo que esté se pueda

verter en los moldes y así conseguir que cada gota de asfalto pese  $0,40 \pm 0,02$  gr (ver Figura 14a), garantizando la cantidad exacta de asfalto entre el tornillo y la superficie de la roca o vidrio, esto se hace para que no haya exceso de asfalto que pueda hacer variar los resultados. Después de realizada la gota de asfalto esta debe colocarse en un recipiente hermético que evite la entrada de polvo o impurezas que afecten la unión asfalto-agregado.

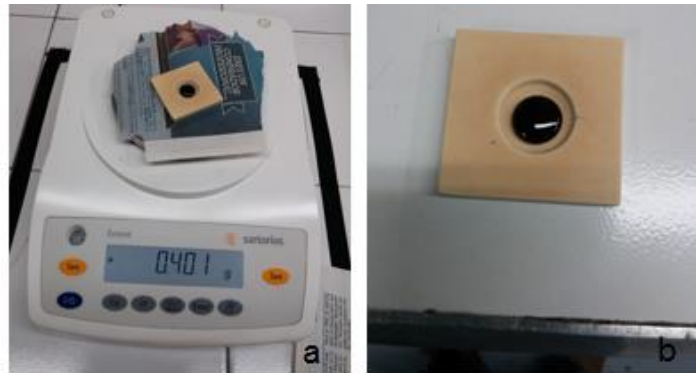


Figura 14 (a) Medición del peso de la gota de asfalto y (b) gota de asfalto.

Fuente: Propia, 2014.

3.2.3.4 Montaje Tornillo- Asfalto-agregado. Al transcurrir los 60 minutos de calentamiento de las rocas, los vidrios y los tornillos, se debe realizar el montaje, este procedimiento consiste en sacar y colocar las rocas o vidrios (Dependiendo de la o las superficies que se vayan a trabajar en ese momento) en un lugar totalmente plano y limpio, colocar la gota de asfalto en la cara biselada del tornillo como se ve en la Figura 15a e inmediatamente después apoyarla, sin ocasionarle fuerza alguna, sobre la superficie, esta interacción tornillo-asfalto-agregado se produce colocándole una pesa estandarizada de 50 gr como se observa en la Figura 13b, hasta que el asfalto debido al calor de las dos superficies y el peso fluya y se deje salir por los orificios de control del tornillo. Después de ese momento se debe esperar 30 segundos y retirar las pesas estandarizadas.





Figura 15 (a) Tornillo con gota de asfalto y (b) Montaje del tornillo con asfalto sobre la superficie. Fuente: Propia, 2014.

3.2.3.5 Acondicionamiento del montaje. Después de realizar el montaje se debe determinar en qué condición se va a ensayar. La norma (AASHTO TP-91, 2011) define las características en las cuales se va a ensayar. Para la condición seca, se deben guardar los montajes realizados dentro de un contenedor libre de humedad, que lo proteja del polvo y totalmente horizontal por 24 horas (ver Figura 16a). Pero si se va a ensayar en condición húmeda, es necesario colocar los montajes en un lugar limpio y seco, esperar una hora para que se consolide la unión asfalto-agregado y pasó seguido debe colocarse en baño maría a 25°C por 96 horas (ver Figura 16b).



Figura 16 (a) Condición seca en un contenedor por 24 horas y (b) Condición húmeda en baño maría por 96 horas. Fuente: Propia, 2014.

### 3.2.4 Metodología del ensayo

3.2.4.1 Calibración del equipo PATTI. La calibración del equipo se realiza con los siguientes elementos, equipo PATTI, computador con el software PQGold (ver Figura 17), prensa de presión. Previo al inicio del proceso se deben indicar los valores patrones de los elementos que componen el PATTI en el software, estos elementos son:

- Verificar el puerto USB al que se encuentra conectado el equipo.
- El tamaño del pistón: F-4.
- El diámetro efectivo del tornillo: 20 mm.
- El peso del tornillo: 40 gr.
- Cambiar el nombre de la prueba.

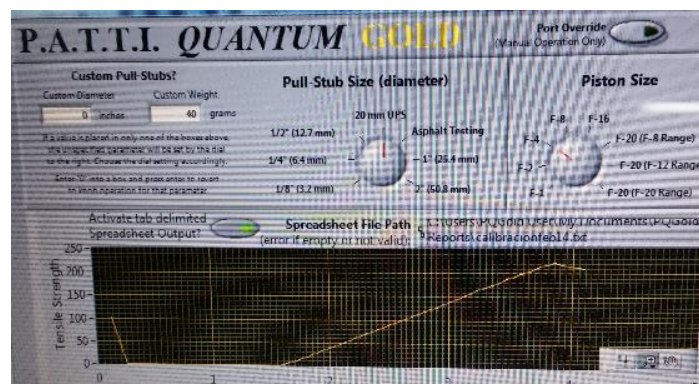


Figura 17 Software PQGold  
Fuente: Propia, 2014.

El proceso inicia al conectar el aire y cargar el medidor neumático del equipo con exactamente 100 psi, la prensa debe estar ajustada a la placa de reacción y el pistón (ver Figura 18a), de tal forma que no queden fugas de aire, al ejecutar el medidor

neumático, regulando el paso de aire, la presión se transmite al pistón a través de la manguera de presión a una velocidad de presión de tracción constante, el software PQGold muestra los resultados en forma de Tiempo vs. Presión a la tracción. Este proceso debe realizarse variando la cantidad de aire que pasa por el medidor neumático hasta que la pendiente de la gráfica sea  $100 \pm 0,02$  (ver Figura 18b).

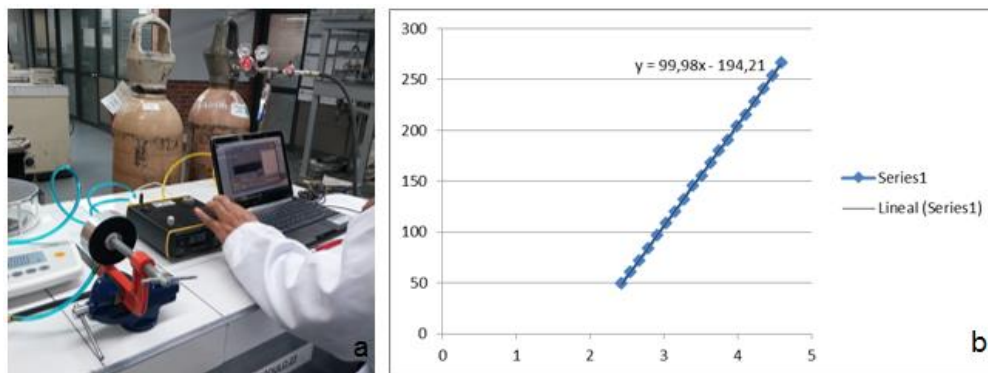


Figura 18 (a) Proceso de calibración del equipo PATTI y (b) Línea de chequeo del proceso de calibración. Fuente: Propia, 2014.

3.2.4.2 Ensayo BBS. Previo a realizar la retirada del tornillo se debe tener controlada la temperatura de ejecución. En el caso del ensayo en condición seca, se debe sumergir media hora después de completadas las 24 horas de realizado el montaje tornillo-asfalto-agregado en un baño maría a  $25^{\circ}\text{C}$ . Completados los 30 minutos se ejecuta la prueba. Para el caso del ensayo en condición húmeda, completadas las 96 horas, se espera media hora para equilibrar el sistema fuera del baño maría, luego se devuelven al baño por media hora nuevamente y finalmente inicia la prueba.

Para los dos casos nombrados anteriormente la prueba se realiza de la misma manera, en las mismas condiciones. Se aplica la carga de presión de aire neumática retirando el tornillo del agregado con cemento asfáltico. La superficie se inspecciona visualmente para determinar el tipo de falta (Ver Figura 19). Si la huella de asfalto es superior al 80% el modo de falla es Cohesivo, pero si por el contrario, la huella es



inferior al 80% el modo de falla es Adhesivo, como se explica en (AASHTO TP-91, 2011)).



Figura 19 Huellas típicas después de realizado en ensayo BBS  
Fuente: Propia, 2014.

### 3.3 ENERGIA SUPERFICIAL LIBRE Y HUMECTABILIDAD

El cálculo de la Energía Superficial Libre y la Humectabilidad se realizó teniendo en cuenta la teoría termodinámica ácido-base, fundamentada en las fuerzas de adhesión intermoleculares y sus componentes, la monopolar ácida - básica, y la no polar (Van Oss, 1994). El ensayo de la Gota Sésil fue usado para poder determinar las componentes mencionadas anteriormente, este cálculo será basado en la formulación de Young-Dupre, donde se relacionan las componentes de la ESL con los ángulos de contacto que se obtienen con el ensayo gracias al Goniómetro. Este ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.

**3.3.1 Adecuación de los Materiales.** Para el ensayo de la Gota Sésil se utilizaron los mismos 4 materiales que fueron descritos en el numeral 3.2.1, pero además para garantizar la superficie de trabajo en las rocas, se pulieron con una lija 280 hasta eliminar cualquier imperfección en la superficie de la roca (ver superficies en la Figura 9).

**3.3.2 Goniómetro.** Este instrumento está diseñado básicamente para la caracterización de la energía superficial en sólidos. Con la ventaja de poder medir el ángulo de contacto de la gota con alta precisión. Dando también la posibilidad de regular el volumen de gota para maximizar la sensibilidad de la medición. El instrumento está conectado a un software controlador de gran alcance para el seguimiento y análisis de forma automática (Bahramian, 2012). Además, el equipo (Figura 20) está compuesto a grandes rasgos por una jeringa y su dispensador de líquidos, por una base ajustable en las tres direcciones, además de una cámara que permite la toma de datos y un ajuste de luminosidad; pero para que este ensayo pueda realizarse debe tener principalmente una cámara que controla la temperatura y permite trabajar con el asfalto.

La prueba de la gota sésil proporcionar la toma de datos de muestra de forma rápida, limpia y sin complicaciones. En este método, la imagen de gotas de líquido con la energía de superficie conocida se captura con precisión para medir la geometría de la gota y calcular la energía superficial del sólido, utilizando la ecuación de Young-Laplace.

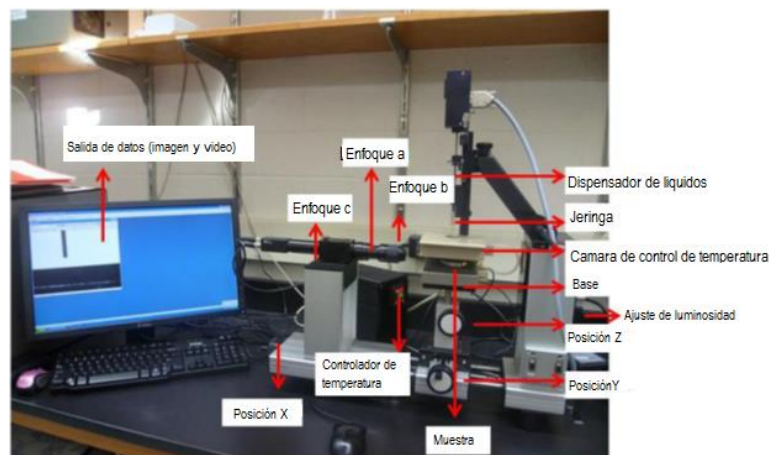


Figura 20 Goniómetro, equipo usado para el ensayo de la gota sésil.  
Adaptado de: (AASHTO TP-91, 2011)

### 3.3.3 Preparación del ensayo.

3.3.3.1 Limpieza de las rocas y vidrios. El proceso de limpieza se realizó para las 4 superficies (las 3 rocas y los vidrios) empezando por limpiar con una toalla de papel remojada con abundante varsol, después con tela humedecida con cetona se limpiaron ambas caras de las rocas y vidrios. De esta manera se limpia superficialmente cualquier rastro de polvo, impurezas y asfalto, se resalta que debido al pequeño tamaño de las gotas cada superficie pudo ser usada en varias ocasiones evitando que el goteo de asfalto se ubique en una posición anteriormente usada.

La limpieza de las superficies culmina con el equipo de limpieza ultrasónica "Cleaner" (Figura 21), al igual que con el equipo usado en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana se trabajó con agua destilada. El equipo se programó a 60°C de temperatura durante 60 minutos.



Figura 21 Equipo de limpieza ultrasónica "Cleaner" del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Fuente: Propia, 2014.

3.3.3.2 Secado de las rocas y vidrios. Terminada la limpieza ultrasónica de las superficies, deben colocarse a secado en el horno a una temperatura de 60°C por 60 minutos. Las rocas y los vidrios deben colocarse sobre un recipiente limpio que evite la contaminación de las superficies como se muestra en la Figura 13.

3.3.3.3 Preparación de las superficies de asfalto. Para obtener las superficies de asfalto se calentó el asfalto a  $150^{\circ}\text{C}$  durante 1 hora. Teniendo el asfalto en estado líquido se sumergieron las láminas de vidrio en asfalto, se extraen del asfalto y se cuelgan de tal manera que se derrame el asfalto restante y se forme una superficie de asfalto totalmente lisa. El proceso de secado y formación de las láminas se realizó dentro de una cabina que evite la entrada de impurezas a las superficies (La lámina de asfalto se muestra en la Figura 22)



Figura 22 Láminas de asfalto. Fuente: Propia, 2014.

3.3.3.4 Llenado de la jeringa termina. Se realizó calentando el asfalto a  $150^{\circ}\text{C}$  por 60 minutos, de esta manera, al estar el asfalto fluido se pudo llenar la jeringa con asfalto. Terminado el llenado la jeringa se deja enfriar, para posteriormente realizar la medición de la Humectabilidad sobre cada superficie.

3.3.3.5 Líquidos de referencia a utilizar. Para el cálculo de la Energía Superficial Libre de las superficies es necesario utilizar tres líquidos de referencia con los valores de sus componentes conocidos. Para nuestro ensayo se utilizaron Formamida, Agua Desionizada y Etilenglicol (Figura 23).

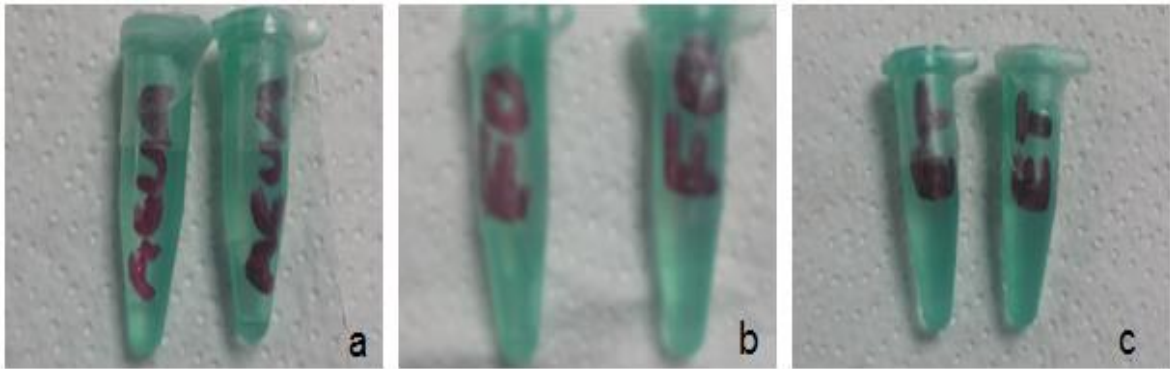


Figura 23 Líquidos de referencia: (a) Agua Desionizada, (b) Formamida y (c) Etilenglicol.  
Fuente: Propia, 2014.

### 3.3.4 Ensayo de la Gota Sésil Para el Cálculo de la Humectabilidad.

3.3.4.1 Preparación del equipo. Se encendió el controlador de luz del equipo, así como el controlador de la cámara térmica. Además se calibró el software para la medición de formas circulares (ver Figura 24). Después de tener limpias las rocas y llena la jeringa de asfalto, se encendió la cámara térmica a 135°C por 30 minutos. Al mismo tiempo, las rocas se deben ubicar sobre la base de medición a temperatura ambiente.

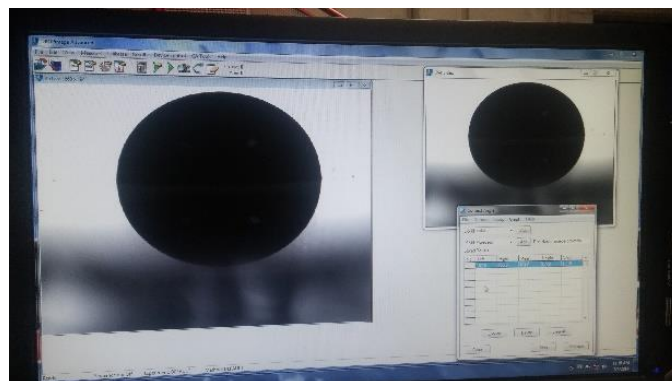


Figura 24 Calibración para medir figuras circulares.  
Fuente: Propia, 2014.

La jeringa térmica de dispersión se ubicó a una altura de 1 ½" pulgadas de la superficie de la roca y lista para dejar caer la primera gota de asfalto.



3.3.4.2 Cálculo de la humectabilidad. En este punto del ensayo se usaron solo las rocas. Cada gota de asfalto debe caer por gravedad en una sola dosis (ver Figura 25a) de aproximadamente 0,3 mL ubicada linealmente una al lado de otra (ver Figura 25c). La medición del ángulo de contacto debe ser realizada inmediatamente después de la colocación de la gota sobre la roca como máximo 1 minuto después (ver Figura 25b). Al momento de ejecutar el software se programó para hacer 5 mediciones para cada gota de asfalto.

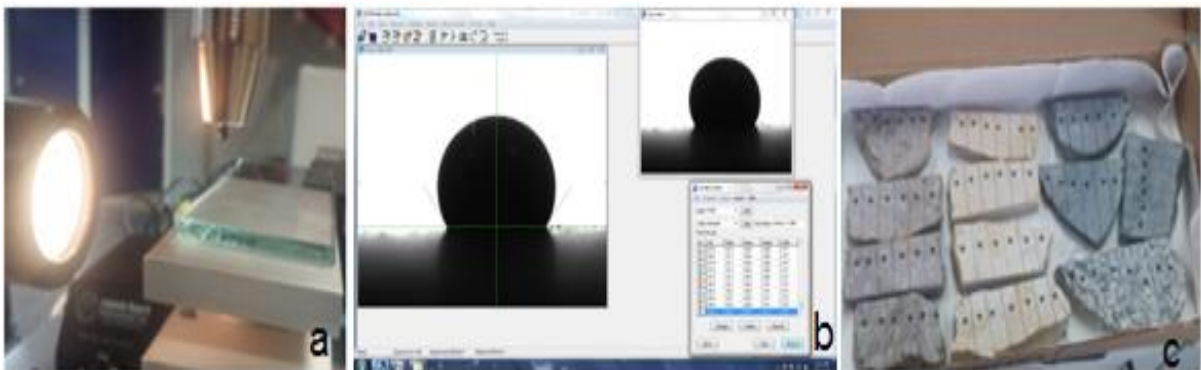


Figura 25 (a) Caída de la gota de asfalto, (b) Medición del ángulo de contacto y (c) Rocas usadas para la medición. Fuente: Propia, 2014.

### 3.3.5 Ensayo de la Gota Para el Cálculo de la Energía Superficial Libre.

3.3.5.1 Preparación del equipo. En este momento del ensayo se usaron las 4 superficies (los 3 tipos de rocas y la lámina de asfalto). Se enciende el controlador de luminosidad y se reemplaza la cámara térmica y la jeringa de asfalto por el dispensador de líquidos a temperatura ambiente. Se realizó el proceso de calibración al igual que en el numeral 3.3.4.1. Se disponen las 4 superficies sobre la base de medición a temperatura ambiente, listas para realizar el ensayo cabe denotar que deben estar libres de impurezas.

La jeringa de dispersión se ubicó a una altura estándar. En este momento del ensayo la base móvil es la que va a variar, subiendo y bajando verticalmente de forma que al subir el líquido tocó la superficie (ver Figura 26), se adhirió, e

inmediatamente se bajó la altura de la superficie y teniendo en cuenta la altura de enfoque de la cámara se tomó la medida del ángulo de contacto.

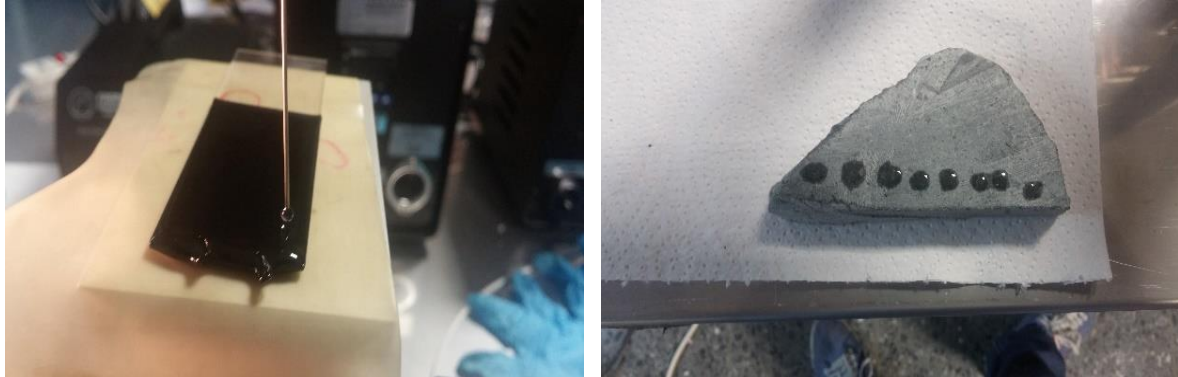


Figura 26 Colocación de las Gotas de los Líquidos de Referencia sobre las Superficies de Asfalto y Rocas. Fuente: Propia, 2014.

3.3.5.2 Ensayo de Gota Sésil sobre Rocas y Asfalto. La dosificación para los líquidos de referencia, al igual que para el asfalto, es de aproximadamente 0,3 mL. La medición del ángulo de contacto se realizó gota por gota, inmediatamente después de la colocación, debido a que la porosidad de los agregados varía el volumen y el ángulo de contacto de los líquidos sobre la superficie. Al momento de ejecutar el software (ver Figura 27) se programó para hacer 5 mediciones para cada gota de cada líquido.

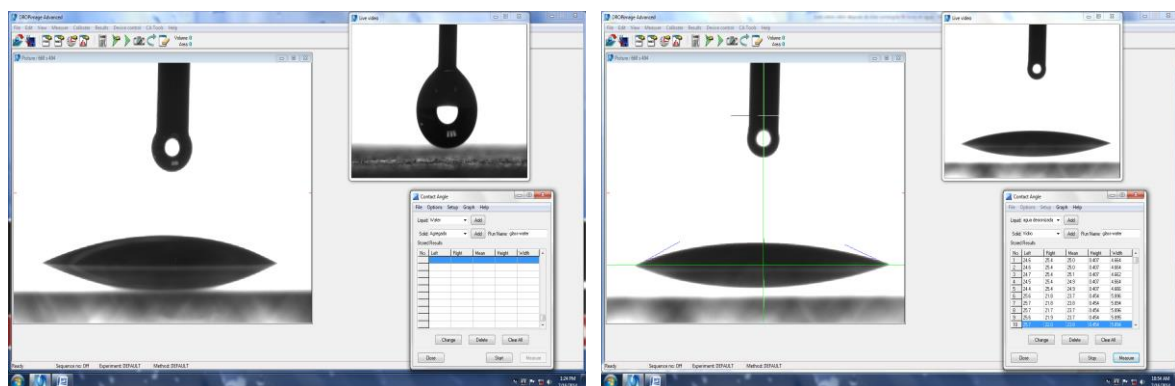


Figura 27 Ejecución del Software DROPIImage Advanced  
Fuente: Propia, 2014.



## 4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 4.1 BITUMEN BOND STRENGTH TEST (BBS TEST)

En este estudio, Se siguió la metodología de la norma AASHTO TP-91 (2011), para el cual, las muestras fueron acondicionadas en agua durante 96 horas. El tiempo de acondicionamiento de las muestras se reflejó en el modo de falla que mostró la huella de asfalto sobre las rocas después de ser arrancados los tornillos, esta tensión de extracción tiene unidades de MPa/seg., ya que, como se nombró anteriormente la absorción de asfalto por parte de las rocas incidió en que las pruebas realizadas sobre areniscas presentaran fallas cohesivas en condiciones seca y húmeda y que las pruebas realizadas sobre caliza presentara falla cohesiva en condición seca y falla adhesiva en condición húmeda, demostrando la baja porosidad y capacidad de captar asfalto por parte de este tipo de roca como se demuestra en la Tabla 1. Cabe recordar que el modo de falla esta discretizado visualmente por el porcentaje de asfalto que queda sobre la superficie de las rocas y que esté es independiente de la tensión necesaria para desprender el tornillo de la roca. Los Anexos 1, 2 y 3 muestran los ensayos en condición seca y los Anexos 4, 5 y 6 muestran los anexos en condición húmeda de los tres diferentes agregados.

Tabla 1 Modo de falla de la Unión Asfalto-agregado para cada condicionamiento.

Superficie	Condición Seca		Condición Húmeda	
	% Perdida de Asfalto Promedio	Modo de Falla	% Perdida de Asfalto Promedio	Modo de Falla
Agregado 1 (Arenisca) Fuente Mondoñedo	98,60%	Falla Cohesiva	96,72%	Falla Cohesiva
Agregado 2 (Arenisca) Fuente Alto La Laguna	94,92%	Falla Cohesiva	92,40%	Falla Cohesiva
Agregado 3 (Caliza) Fuente Rio Coello	88,60%	Falla Cohesiva	40,00%	Falla Adhesiva

Fuente: Elaboración propia, 2014.





Lo mostrado en la tabla anterior se puede explicar físicamente con los porcentajes de absorción de los tres tipos de rocas, ya que, las rocas de Mondoñedo y del Alto La Laguna por ser areniscas tienen más poros saturables y mayor porcentaje de absorción que la roca del Río Coello que es una caliza, reflejándose en que las areniscas tienen 10 veces más absorción de agua que la caliza.

Al momento de cuantificar los valores de la tensión (ver Figura 28) necesaria para arrancar el tornillo de la unión asfalto-agregado se usó la ecuación 2-7 (POTS) que depende del área de contacto dejada por la huella de asfalto después de ejecutado el arranque del tornillo ( $A_g$ ) y la tensión de arranque obtenida en el ensayo ( $B_P$ ). En condiciones secas las tres rocas fallaron cohesivamente, lo que nos dice, que las fuerzas de adhesión de la interface asfalto-agregado se comportó aún mejor que las fuerzas internas de cohesión del asfalto. Pero en condición húmeda la roca caliza cambió totalmente del modo de falla, presentando pérdida del material asfáltico de más del 60%, debido físicamente a que como se explicó anteriormente su porcentaje de absorción de agua es menor que el de las areniscas. El comportamiento por parte de las calizas era el esperado, ya que como lo expresaron Tan & Guo (2013) las piedras calizas son muy sensibles a la humedad.

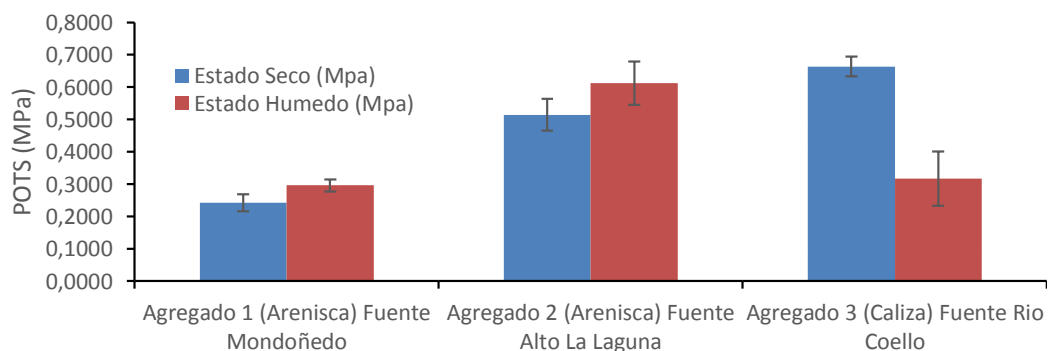


Figura 28 Valores de POTS para las tres rocas en las dos condiciones.  
Fuente: Propia, 2014.

Un factor a destacar es que aunque visualmente la unión sufrió cambios, los resultados nos demuestran al igual que en el estudio de Figueroa et al. (2013) que

comparando los resultados en condición seca con los resultados obtenidos en condición húmeda la presión de arranque aumento, pero no cambio significativamente, mostrando que la humedad en función del tiempo no influye negativamente en el aumento de la adhesión de la unión asfalto-agregado.

Las huellas de asfalto sobre las superficies de los diferentes agregados muestran claramente el daño por humedad causado por el agua al entrar en contacto con la unión asfalto-agregado. En condición seca (Figura 29) las uniones del asfalto con cada uno de los tres tipos de roca fallaron por cohesión, debido a que la unión adhesiva fue mayor, mostrado en las huellas de asfalto que se evidenciaron después de arrancado el tornillo, las cuales fueron completas. Las pruebas realizadas en condición húmeda para los agregados de Mondoñedo (Figura 30a) y del Alto La Laguna (Figura 30b) mostraron la baja afectación por humedad de la unión dejando una huella de asfalto superior al 80%, en cambio las pruebas mostraron que el agregado del Rio Coello (Figura 30c) se ve afectado en gran medida por la humedad. Por ese motivo, la unión asfalto-agregado falló adhesivamente. Más adelante se explicara la afectación de la huella de asfalto sobre la tensión de arranque POTS (Pull-Out Tensile Strength).

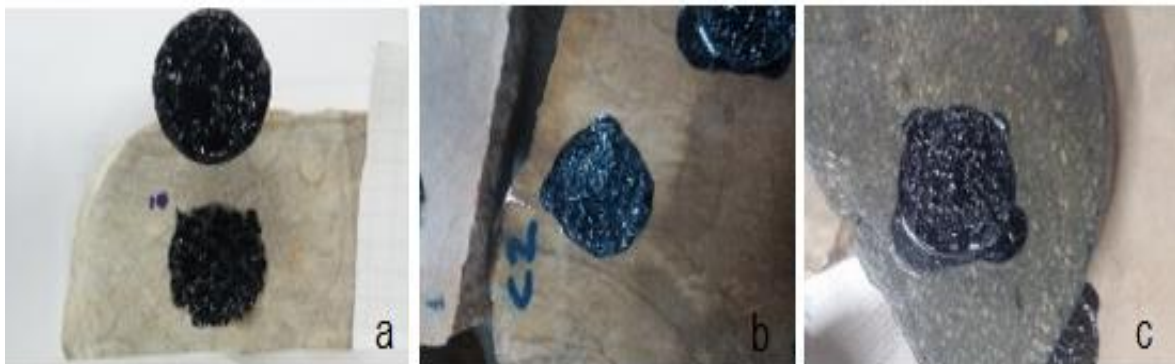


Figura 29 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado en Condición Seca.  
Fuente: Propia, 2014.



Figura 30 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado en Condición Húmeda.  
Fuente: Propia, 2014.

En la Figura 28 se puede ver claramente como en las areniscas la tensión de arranque aumenta a pesar de estar acondicionadas las mismas 96 horas que la caliza, esto se puede entender al comparar la unión asfalto-agregado al ser ensayado en condiciones seca y húmeda, al ver el comportamiento de los tres tipos de rocas al ser ensayado en seco, se destaca que la falla fue cohesiva entre las partículas de asfalto, por lo tanto, la tensión de arranque no se ve tan reducida por la pérdida de asfalto, pero al revisar la unión creada en la interface entre las areniscas y el asfalto en condiciones húmedas se ve que esta es suficientemente resistente como para no ser desplazada por el agua (ver Figura 30), por lo tanto, la interface se va consolidando con el tiempo y presenta un aumento en la tensión de arranque. Lo contrario sucede con la caliza, ya que el asfalto es desplazado con mayor facilidad al estar en contacto con agua por 96 horas (ver Figura 30). Este efecto se explica también, matemáticamente debido a que la huella residual de asfalto disminuye más del 50% al pasar de 88,6% para condición seca a 39,7% en condición húmeda por lo tanto la tensión de arranque es afectada en gran medida lo cual explica la reducción en POTS de la caliza mostrada en la Figura 28. Mientras que, para las areniscas la disminución de la huella de asfalto no alcanza a llegar al 4%.



## 4.2 ENERGÍA SUPERFICIAL LIBRE Y HUMECTABILIDAD

**4.2.1 Determinación de los Ángulos de Contacto.** Los ángulos de contacto obtenidos mediante el ensayo de la Gota Sésil son mostrados en las Tablas 2, 3, 4 y 5. La Tabla 2 es obtenida al momento de determinar la humectabilidad del asfalto sobre las superficies de los tres agregados estudiados, este se determina al usar el asfalto como líquido. Las Tablas 3, 4 y 5 muestran los ángulos de contacto formados entre los tres líquidos de referencia y las cuatro superficies, de este modo, se calcula la ESL para cada uno de las superficies (estas fueron los 3 agregados y la lámina de asfalto). Para simplificar las tablas se nombraron tomando como referencia las iniciales de los líquidos y de las superficies, el asfalto se discrimino como “A” la Formamida como “F”, el Etilenglicol como “E”, y el Agua Desionizada como “H2O”. Los agregados fueron nombrados de la siguiente manera: El primer agregado obtenido en Mondoñedo fue nombrado “C1MO”, el segundo del Alto La Laguna se nombró “C2AL” y el tercer agregado traído del Rio Coello recibió el nombre de “C3RC”.

En la Tabla 2 se pueden observar los ángulos de contacto formados entre las superficies de las rocas y las gotas de asfalto. Los ángulos de contacto formados van desde 155,9° hasta 161,4°, estos valores demuestran que el asfalto no moja las superficies de las rocas ya que el ángulo formado entre los dos materiales es muy superior a 90° (ver Anexos 7, 8 y 9)

Tabla 2 Resumen Ángulos de Contacto Promedio con el Ensayo Gota Sésil (Asfalto)

<b>Superficie</b>	<b>Ángulo contacto</b>	<b>COV</b>
<b>AC1MO</b>	155,9	3,13%
AC2AL	159,2	2,21%
AC3RC	161,4	2,22%

Fuente: Elaboración propia, 2014.



Las Tablas 3, 4 y 5 reflejan el comportamiento esperado, debido a que los líquidos de referencia al entrar en contacto con las rocas mojan la superficie (ángulo de contacto menor a 90°) y debido a su porosidad son absorbidos con rapidez (ver Anexos 11, 12, 13, 15, 16, 17, 19, 20 y 21), lo contrario sucede en la interacción de estos líquidos con la lámina de asfalto (ver Anexos 10, 14 y 18), ya que al no ser solventes de asfalto estas gotas caen y permanecen casi inalteradas sobre la superficie mostrando ángulos muy aproximados a 104°

Tabla 3 Resumen Ángulos de Contacto Promedio con el Ensayo Gota Sésil (Formamida).  
 Ver Anexos 10, 11, 12 y 13.

<b>Superficie</b>	<b>Promedio</b>	<b>COV</b>
FA	105,2	1,32%
FC1MO	20,0	5,78%
FC2AL	22,8	4,67%
FC3RC	31,7	6,23%

Fuente: Elaboración propia, 2014.

Tabla 4 Resumen Ángulos de Contacto Promedio con el Ensayo Gota Sésil (Etilenglicol).  
 Ver Anexos 14, 15, 16 y 17.

<b>Superficie</b>	<b>Promedio</b>	<b>COV</b>
EA	104,0	1,33%
EC1MO	10,5	6,17%
EC2AL	22,9	4,20%
EC3RC	34,7	5,59%

Fuente: Elaboración propia, 2014.

Tabla 5 Resumen Ángulos de Contacto Promedio con el Ensayo Gota Sésil (Agua Desionizada). Ver Anexos 18, 19, 20 y 21.

<b>Superficie</b>	<b>Promedio</b>	<b>COV</b>
H2OA	103,9	0,82%
H2OC1MO	18,2	4,53%
H2OC2AL	27,1	3,46%
H2OC3RC	31,0	5,81%

Fuente: Elaboración propia, 2014.



**4.2.2 Cálculo de las Componentes de la Energía Superficial Libre Total.** El cálculo de las componentes monopolar acida, monopolar básica, y la no polar son fundamentales en el cálculo de la Energía Superficial Libre Total de los tres agregados usados en la investigación y del asfalto 60/70 Barrancabermeja, esta teoría termodinámica fundamentada en las fuerzas de adhesión intermoleculares y sus componentes relacionadas con los ángulos de contacto obtenido del ensayo de la Gota Sésil, apoyado en la fórmula de Young-Dupre (Formula 2-6) para el cálculo del trabajo adhesivo, como se muestra a continuación.

$$\gamma_L * (1 + \cos\theta) = 2 * \sqrt{\gamma_S^{LW} * \gamma_L^{LW}} + 2 * \sqrt{\gamma_S^+ * \gamma_L^-} + 2 * \sqrt{\gamma_S^- * \gamma_L^+} \quad (4-1)$$

La ecuación (4-1) se transforma en un sistema matemático de 3x3, el que se resuelve matricialmente, del cual se conocen los valores de las variables  $\gamma_L$  : energía superficial total del líquido de referencia;  $\gamma_L^{LW}$  : Componente apolar o parámetro de Lewis-Van der Waals;  $\gamma_L^+$  : Parámetro ácido;  $\gamma_L^-$  : Parámetro básico; y  $\theta$  : Ángulo de contacto medido en el ensayo de la gota sésil. Estos valores están referenciados en la Tabla 6.

Tabla 6 Componentes de la Energía Superficial Libre de los Líquidos de Prueba a 20°C.

Líquido	Energía Libre Superficial Total	Componente Apolar	Parámetro Ácido	Parámetro Básico
	$\gamma^{\text{total}}$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\gamma^{LW}$	$\gamma^+$	$\gamma^-$
Agua Desionizada	72,80	21,80	25,50	25,50
Formamida	57,50	38,50	2,30	39,60
Etilenglicol	48,00	29,00	1,92	47,00

Fuente: (Caro-Spínel & Alvarez-Lugo, 2009)

La expresión matricial se generara de la siguiente manera  $\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{B}$ , Cada término es un miembro del problema matricial:



$$A = \begin{bmatrix} \sqrt{\gamma_{l1}^{LW}} & \sqrt{\gamma_{l1}^+} & \sqrt{\gamma_{l1}^-} \\ \sqrt{\gamma_{l2}^{LW}} & \sqrt{\gamma_{l2}^+} & \sqrt{\gamma_{l2}^-} \\ \sqrt{\gamma_{l3}^{LW}} & \sqrt{\gamma_{l3}^+} & \sqrt{\gamma_{l3}^-} \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

$$x = \begin{bmatrix} \sqrt{\gamma_s^{LW}} \\ \sqrt{\gamma_s^-} \\ \sqrt{\gamma_s^+} \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

$$B = 0,5 * \begin{bmatrix} \gamma_{l1}(1 + \cos \theta_1) \\ \gamma_{l2}(1 + \cos \theta_2) \\ \gamma_{l3}(1 + \cos \theta_3) \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

Donde, los subíndices  $l1$ ,  $l2$  y  $l3$  reseñan a los líquidos de referencia y el subíndice  $s$  especifica una determinada superficie. Por lo anterior, las matrices “A” y “B” son valores conocidos y la matriz “x” son los valores a calcular de los componentes de la energía superficial total de cada superficie.

Así pues, después de desarrolladas las matrices, la Tabla 7 presenta los componentes de Energía Superficial Libre del Asfalto 60-70 Barrancabermeja y de los tres agregados utilizados en la investigación. Se puede deducir que comparativamente el agregado con menor tendencia a formar una nueva superficie de área individualizada es el agregado de Mondoñedo, esto significa, que a menor ESL mayor será la capacidad del material en estar en contacto con otro y no tratar de separarse.



Tabla 7 Resumen Energía Superficial Libre Total (ergs/cm<sup>2</sup>) y sus Componentes

Superficie	C. Acido (+) y c. Basico (-)		C. Acido- Basico	C. Apolar	ESLT
			$\gamma^{AB}$ (ergs/cm <sup>2</sup> )	$\gamma^{LW}$ (ergs/cm <sup>2</sup> )	$\gamma$ (ergs/cm <sup>2</sup> )
Asfalto 60-70	$\gamma^-$	0,098	1,886	8,998	10,883
Barrancabermeja	$\gamma^+$	9,111			
Agregado 1	$\gamma^-$	56,223	14,199	65,849	80,047
Mondoñedo (arenisca)	$\gamma^+$	0,896			
Agregado 2 Alto	$\gamma^-$	50,440	23,784	78,607	102,391
La Laguna (arenisca)	$\gamma^+$	2,804			
Agregado 3 Rio	$\gamma^-$	52,161	30,459	80,060	110,519
Coello (caliza)	$\gamma^+$	4,447			

Fuente: Elaboración propia, 2014.

De acuerdo con A. Bhasin & Little (2007) la Energía Superficial Libre Total típicamente en los ligantes asfálticos está en el intervalo de 15 a 45 ergios/cm<sup>2</sup> y la Energía Superficial Libre Total en los agregados pétreos se encuentra en el intervalo de 50 a 400 ergios/cm<sup>2</sup>, otro aspecto que certifica el buen cálculo de la ESL y sus componentes, es el hecho, que A. Bhasin & Little (2007); Howson, Masad, Bhasin, Little, & Lytton (2011) muestran que para los agregados pétreos la magnitud del componente básico siempre será significativamente mayor, contrario a lo que sucede en los ligantes asfálticos donde el componente ácido será el mayor de los dos componentes polares.

Con el objeto de ilustrar como se encuentran los agregados pétreos y el ligante asfáltico usado en la investigación, se presentan dos tablas que evidencian que los resultados obtenidos a través de esta metodología de cálculo aciertan totalmente, ya que son valores que concuerdan con estudios anteriores, por ejemplo, para Caro-Spín & Alvarez-Lugo (2009) como se observa en la Tabla 8 el asfalto colombiano se encuentra en el orden de los 10,8 y 12,1 ergios/cm<sup>2</sup>, y como vimos en la Tabla 7 el asfalto estudiado tiene 10,9 ergios/cm<sup>2</sup> de ESL total.





Tabla 8 Energía Superficial Libre de Ligante Asfáltico Basado en Ángulos de Contacto

Ligante Asfáltico	$\gamma$ (ergs/cm <sup>2</sup> )
Apiay	10,79
Barrancabermeja	12,06

Fuente: Caro-Spindel & Alvarez-Lugo (2009)

Los agregados pétreos de esta investigación también tienen valores muy congruentes con el mismo estudio, como se puede observar en la T9 los valores de la Arenisca de Oklahoma y la Caliza de Ohio concuerdan con los valores de ESL, calculados con la rutina mencionada en el numeral 4.2.2 y mostrada en el Anexo 26, donde se obtuvieron para la Arenisca del Alto la Laguna una ESL de 102,4 ergios/cm<sup>2</sup> y para la Caliza del Rio Coello una ESL de 110,5 ergios/cm<sup>2</sup>. La rutina

Tabla 9 Energía Superficial Libre en Agregados Pétreos

Agregado	$\gamma$ (ergs/cm <sup>2</sup> )
Granito (Oklahoma)	425,18
Cuarcita (Arkansas)	200,07
Arenisca (Oklahoma)	104,98
Caliza (Ohio)	111,15

Modificado de: Caro-Spindel & Alvarez-Lugo (2009)

### 4.3 Trabajo de Adhesión y Daño por Humedad

**4.3.1 Trabajo de Adhesión.** Como se explicó anteriormente, el trabajo de adhesión es la energía necesaria para propagar una grieta en una unidad de área en la interface de dos materiales (Caro-Spindel & Alvarez-Lugo, 2011), por lo tanto, este trabajo adhesivo necesita relacionar las ESL de dos materiales, en este caso Asfalto-agregado, para así determinar que combinación de materiales necesitara menor y mayor cantidad de energía para separarse.



Tabla 10 Trabajo de Adhesión en Seco entre el Asfalto 60-70 Barrancabermeja y los Agregados Petreos

Ligante	Agregado	W <sub>SL</sub> (ergs/cm <sup>2</sup> )
Asfalto 60-70 Barrancabermeja	Agregado 1 Mondoñedo (arenisca)	59,08
Asfalto 60-70 Barrancabermeja	Agregado 2 Alto La Laguna (arenisca)	67,73
Asfalto 60-70 Barrancabermeja	Agregado 3 Rio Coello (caliza)	70,92

Fuente: Elaboración propia, 2014.

En la Tabla 10 se puede ver la combinación de ligantes asfálticos y agregados y sus respectivos valores de trabajo adhesivo, allí se ve claramente que en seco la combinación que tiene mayor capacidad adhesiva es el agregado del Rio Coello con el Asfalto 60-70 Barrancabermeja, debido a que la energía necesaria para separar las dos superficies es mayor que en las otras dos superficies. Como explica Caro-Spín & Alvarez-Lugo (2011) Los sistemas de Unión asfalto-agregado entre materiales con altos valores de trabajo adhesivo están asociados con una mayor resistencia a la fractura (mayor vida en fatiga). Por lo tanto, altos valores de trabajo adhesivo es una condición deseable en toda mezcla asfáltica.

El trabajo adhesivo en húmedo es usado para determinar el efecto del agua al actuar entre la unión asfalto-agregado, esta acción se debe a la afinidad del agua con los agregados pétreos, por lo que, las rocas se dejan envolver fácilmente por el agua, contrario a lo que sucede con el asfalto, que es un material hidrofóbico. La metodología para el cálculo del trabajo adhesivo en condición húmeda es a través de los valores individuales de la ESL. Así, usando la ecuación (2-3) incluyendo un tercer material, en este caso el agua, se pudo calcular el trabajo de adhesión entre un ligante asfáltico y un agregado pétreo cuando el agua está presente en su interface. La ecuación para trabajo adhesivo en húmedo sería:

$$W_{LWS}^{HÚMEDO} = \gamma_{LW} + \gamma_{SW} - \gamma_{LS} \quad (4-5)$$



Donde, los subíndices  $L$ ,  $W$ , y  $S$  se refieren a las combinaciones de trabajo adhesivo entre el Ligante Asfáltico, el Agua y los Agregados Pétreos respectivamente.

Tabla 11 Trabajo de Adhesión en Húmedo entre el Asfalto 60-70 Barranca y los Agregados Petreos y Agua.

Ligante	Agregado	$\gamma_{LW}$	$\gamma_{SW}$	$\gamma_{LS}$	$\frac{W}{LWS}^{HUM}$
Asfalto 60-70 Barrancabermeja	Agregado 1 Mondoñedo (Arenisca)	61,65	161,07	59,08	163,63
Asfalto 60-70 Barrancabermeja	Agregado 2 Alto La Laguna (Arenisca)	61,65	171,43	67,73	165,35
Asfalto 60-70 Barrancabermeja	Agregado 3 Rio Coello (Caliza)	61,65	177,79	70,92	168,52

Fuente: Elaboración propia, 2014.

En la Tabla 11 se puede ver que el trabajo adhesivo entre el asfalto y el agua en los tres casos es exactamente el mismo, pero, las componentes agregado agua y agregado asfalto tienen variaciones mínimas, dando como resultado que el trabajo adhesivo húmedo varié para las tres combinaciones de asfalto-agua -agregado. Pero, en realidad, estas variaciones no son significativas, mostrando que los tres tipos de agregados tienen un comportamiento similar en presencia del agua.

**4.3.2 Daño por Humedad.** Siempre se anhela que un sistema Ligante asfáltico–agregado pétreo tenga buenas condiciones de adhesión en estado seco y que la pérdida de material ligante (stripping) sea lo mínimo posible en presencia de agua. Lo anterior se relaciona con el IDH con el hecho que a mayor magnitud de trabajo adhesivo, mayor será la energía necesaria para generar la pérdida de material en la mezcla asfáltica. Altos valores de IDH están relacionados con mezclas resistentes al daño por humedad (Caro-Spínel & Alvarez-Lugo, 2011). Por consiguiente, el IDH se usó para comparar el comportamiento de la unión Asfalto-agregado, dando valores que posicionaran cada unión según su afectación por humedad.



Tabla 12 Índice de Daño por Humedad (IDH) de las diferentes Uniones Asfalto-agregado.

Ligante	Agregado	IDH
Asfalto 60-70 Barrancabermeja	Agregado 1 Mondoñedo (Arenisca)	0,361
Asfalto 60-70 Barrancabermeja	Agregado 2 Alto La Laguna (Arenisca)	0,410
Asfalto 60-70 Barrancabermeja	Agregado 3 Rio Coello (Caliza)	0,421

Fuente: Elaboración propia, 2014.

Los valores que se ven en la Tabla 12 sugieren que, los tres agregados pétreos utilizados en la ciudad de Bogotá al ser mezclados con asfalto 60-70 Barrancabermeja se ven afectados de manera similar por la humedad, esto se debe matemáticamente a que los valores de trabajo adhesivo en seco y húmedo también son muy similares entre ellos. El IDH clasifica cualitativamente la resistencia al daño por humedad de las mezclas asfálticas. Bhasin et al. (2006) enmarcaron a las mezclas asfálticas en tres grandes grupos según su IDH, aquellas con valores mayores a 1,5 de IDH como altamente resistentes al daño por humedad en campo, mezclas con IDH entre 0,5 y 1,5 como mezclas de resistencia media al daño por humedad y por último, mezclas con IDH inferior a 0,5 como altamente susceptibles al daño por humedad. Esto indica que los agregados usados actualmente en la ciudad de Bogotá son altamente afectados por la humedad, y que la diferencia entre ellos no es considerable.

Como expresan Caro-Spindel & Alvarez-Lugo (2011) es importante aclarar, que los valores de IDH proveen información sobre la susceptibilidad termodinámica al daño por humedad, pero no permiten comparar la velocidad de deterioro a la cual se espera que ocurran estos procesos de daño.

**4.3.3 Relación del Daño por Humedad determinado con el ensayo BBS y el Trabajo Adhesivo.** Al momento de relacionar los resultados directos de afectación de la unión asfalto-agregado obtenidos con el ensayo BBS en condición seca



(Figura 29) y el comportamiento adhesivo de dicha unión basado en el formulación de Young-Dupre (Figura 32) se puede ver que siguen la misma tendencia ya que para los dos ensayos en ambas condiciones la unión más débil fue el agregado 1 (arenisca) extraído de la zona de Mondoñedo y la unión más fuerte fue el agregado 3 (caliza) explotado del Rio Coello, pero también, se detalló que al momento de acondicionar los ensayos BBS, físicamente el agregado 3 es el más afectado, como quedó demostrado al ser la única unión que fallo por adhesión. Este hecho nos sugiere, que el agregado 2 (arenisca) extraído del Alto la Laguna, ante los dos ensayos fue el que presento un comportamiento más uniforme, Primero, los valores de trabajo de adhesión seco y húmedo, así como el IDH son bastante cercanos a los obtenidos para la caliza del Rio Coello Y segundo, para el ensayo BBS la unión asfalto 60-70 Barrancabermeja con la arenisca extraída del Alto La Laguna solicita tensiones de arranque (POTS) muy cercanas a las tensiones solicitadas por la caliza del Rio Coello, pero con mejor comportamiento de la unión al ser sometido al acondicionamiento desfavorable (96 horas en contacto directo con el agua).

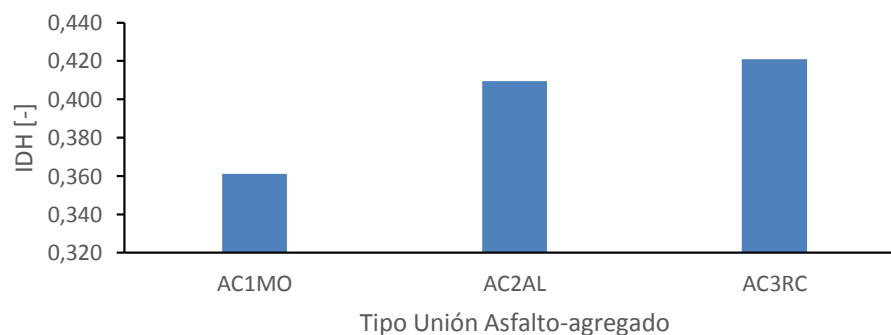


Figura 31 Índice de Daño por Humedad (IDH) de las diferentes Uniones Asfalto-agregado.  
Fuente: Propia, 2014.



## 5 CONCLUSIONES

La absorción es una propiedad física de los agregados pétreos que afecta significativamente el comportamiento de la unión Asfalto-agregado, ya que a mayor absorción, mayor será la dificultad a separar el ligante asfáltico y el agregado pétreo.

Las uniones asfalto-agregado estudiadas presentaron incrementos de resistencia a la tracción de arranque utilizando el ensayo Bitumen Bond Strength (BBS) en condición húmeda comparada con la resistencia a la tracción obtenida en condición seca. Aunque el aumento no fue significativo, mostró que el agua no influye en la disminución de la energía de arranque requerida.

Los menores ángulos de contacto del asfalto sobre los agregados indican mayor capacidad de mojar, debido a que este cubre mayor superficie de área de determinada superficie. Pero no se puede tomar como resultado definitivo, ya que los ángulos de contacto no son definitivos para determinar el comportamiento de la mezcla asfáltica pues necesita del IDH para comprender el comportamiento termodinámico real de las Uniones Asfalto-agregado

Los tres agregados estudiados se clasificaron según el IDH como muy susceptibles a la humedad, pero el segundo agregado (arenisca) del Alto la Laguna, tuvo el comportamiento más uniforme al ser sometido a los ensayos BBS con un valor promedio de tracción de arranque alto y menor pérdida de ligante asfáltico al estar condicionado; y además, el trabajo adhesivo en la interface fue relativamente alto, por lo que, en comparación con los otros agregados estudiados fue el de mejor comportamiento al ser afectado por la humedad.

Las interfaces de las uniones asfalto-agregado que presentan altos valores de trabajo adhesivo, están asociados con mezclas con mayor vida en fatiga, ya que están menos propensas a generar grietas internas.



---

## 6 RECOMENDACIONES

El ensayo BBS, es un ensayo práctico, ágil y repetitivo que hasta el momento indica franjas de comportamiento de los agregados, por lo tanto, el ensayo sería más cómodo y certero haciendo más controlado la inyección de aire al montaje Tornillo-Asfalto-agregado.

Los resultados mostrados anteriormente justifican la necesidad de seleccionar cuidadosamente los materiales de pavimentación de forma que la unión Asfalto-agregado genere altos valores de trabajo de adhesión en estado seco comparado con el trabajo de adhesión húmedo, para así, buscar baja susceptibilidad al debilitamiento de dicha unión por acción del agua.

Debido a que los materiales estudiados están clasificados como altamente afectados por la humedad, sería recomendable introducir un modificador que reduzca la afinidad de los agregados por el agua y así reducir de cierta manera la entrada de agua a la unión Asfalto-agregado.



## REFERENCIAS

- AASHTO TP-91. (2011). *Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Bitumen Bond Strength (BBS) Test* (No. TP-XX-11). AASHTO. Recuperado a partir de <https://uwmarc.wisc.edu/binder-bond-strength>
- Alvarez, A. E., & Ovalles, E. (2012). Análisis De Sistemas Asfalto-Agregado a Partir De Mediciones De Energía Superficial Libre. *Dyna*, 111-119.
- ASTM D907–12a. (2012). *Terminology of Adhesives* (No. D907–12a). ASTM D907–12a. Recuperado a partir de [https://bases.javeriana.edu.co/f5-w-687474703a2f2f656e74657270726973652e6173746d2e6f7267\\$\\$/SUBSCRIPTION/NewValidateSubscription.cgi?D907-HTML](https://bases.javeriana.edu.co/f5-w-687474703a2f2f656e74657270726973652e6173746d2e6f7267$$/SUBSCRIPTION/NewValidateSubscription.cgi?D907-HTML)
- ASTM D7334. (2013). *Standard Practice for Surface Wettability of Coatings, Substrates and Pigments by Advancing Contact Angle Measurement* (No. ASTM D7334). ASTM International. Recuperado a partir de <http://www.astm.org/Standards/D7334.htm>
- Bahramian, A. (2012). Evaluating surface energy components of asphalt binders using Wilhelmy Plate and Sessile Drop Techniques.
- Bhasin, A., & Little, D. (2007). Characterization of Aggregate Surface Energy Using the Universal Sorption Device. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(8), 634-641. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:8(634)
- Bhasin, A., Masad, E., Little, D., & Lytton, R. (2006). Limits on Adhesive Bond Energy for Improved Resistance of Hot-Mix Asphalt to Moisture Damage. *Transportation Research Record*, 1970(1), 3-13. doi:10.3141/1970-03
- Canestrari, F., Cardone, F., Graziani, A., Santagata, F. A., & Bahia, H. U. (2010). Adhesive and Cohesive Properties of Asphalt-Aggregate Systems Subjected to Moisture Damage. *Road Materials and Pavement Design*, 11(sup1), 11-32. doi:10.1080/14680629.2010.9690325
- Caro-Spindel, S., & Alvarez-Lugo, A. E. (2009). Determining surface free energy for Colombian asphalts. *Ingeniería e Investigación*, 29(2), 20-24.





- Caro-Spindel, S., & Alvarez-Lugo, A. E. (2011). Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas. *Revista Facultad de Ingeniería*, 0(58), 95-104.
- Caro-Spindel, S., Masad, E., Bhasin, A., & Little, D. N. (2008). Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering - INT J PAVEMENT ENG*, 9(2), 81-98. doi:10.1080/10298430701792128
- Carrillo M., A., & Gamboa R., M. (2007). *Estudio de la Adhesión Asfalto-Agregado mineral de Fuentes Aluviales en la Zona de Bucaramanga*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Chuanfeng, Z., Chuanjing, C., Dajun, Z., Zhenfeng, S., & Shi, Z. (2014). Test Technology Study on Mesoscopic Shear Strength of Mineral Aggregate Contact Surface. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(1), 90-98. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000767
- Dupré, A., & Dupré, P. (1869). *Théorie mécanique de la chaleur* (New York Public Library.). Gauthier-Villars. Recuperado a partir de <http://archive.org/details/thoriemcaniqued00duprgoog>
- Figuroa, A. S., Velasquez, R., Reyes, F. A., & Bahía, H. (2013). Effect of Water Conditioning for Extended Periods on the Properties of Asphalt Binders. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2372(-1), 34-45. doi:10.3141/2372-05
- Garcés G., B., & García A., I. Z. (2002). Estudio de la adhesión Agregado - Asfalto en presencia de la Presión de Poro., (Proyecto de grado como requisito parcial para optar el título de Ingeniería Civil).
- Gutiérrez-Muñiz, A. (2008). Como saber si nuestra mezcla asfáltica será resistente a la acción del agua. Presentado en XXXV Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Ciudad de Rosario (Santa Fé).
- Howson, J., Masad, E., Bhasin, A., Little, D., & Lytton, R. (2011). Comprehensive analysis of surface free energy of asphalts and aggregates and the effects of



- changes in pH. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2554-2564.  
doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.098
- IDU. (2014). Estado de la Malla Vial de Bogotá 2013. Dirección Técnica Estratégica.
- Ishai, I., & Craus, J. (1977). EFFECT OF THE FILLER ON AGGREGATE-BITUMEN ADHESION PROPERTIES IN BITUMINOUS MIXTURES (Vol. 46). Presentado en Association of Asphalt Paving Technologists Proc. Recuperado a partir de <http://trid.trb.org/view.aspx?id=87367>
- Kassem, E., Masad, E., Lytton, R., & Bulut, R. (2009). Measurements of the moisture diffusion coefficient of asphalt mixtures and its relationship to mixture composition. *International Journal of Pavement Engineering*, 10(6), 389-399.  
doi:10.1080/10298430802524792
- Kyatham, V., & Khattak, M. J. (2008). Mechanistic Characteristics of Moisture Damaged Asphalt Matrix and Hot Mix Asphalt Mixtures. *Airfield and Highway Pavements*, 134-146. doi:10.1061/41005(329)12
- Mallick, R. B., Pelland II, R., & Hugo, F. (2005). Use of accelerated loading equipment for determination of long term moisture susceptibility of hot mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 6(2), 125-136.  
doi:10.1080/10298430500158984
- Montes, B., & Paez, O. (2010). *Estudio comparativo de ensayos para determinar la adherencia agregado-asfalto*. Universidad de Santander, Bucaramanga.
- Moraes, R. (2011). *Validation of the Bitumen Bond Strength Test Using Surface Energy Measurements*. University of Wisconsin – Madison.
- Moraes, R., Bahia, H., & Velasquez, R. (2011a). Selección de Materiales para Mezclas Asfálticas Resistentes al Daño por Humedad Utilizando el Método de La Gota Sésil.
- Moraes, R., Velasquez, R., & Bahia, H. (2011b). Measuring Effect of Moisture on Asphalt-Aggregate Bond with the Bitumen Bond Strength Test. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 3(2209), pp. 70-81.



- Pocius, A. V. (2002). Adhesion and Adhesives Technology. En A. V. Pocius (Ed.), *Adhesion and Adhesives Technology (Third Edition)* (pp. I-XVI). Hanser. Recuperado a partir de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9783446427488500013>
- Rondón-Quintana, H. A., & Moreno-Anselmi, L. Á. (2010). Influence of Water on Asphalt Mixture Stripping: A Study on Asphalt Binders. *Ingeniería y Universidad*, 14(2), 297-312.
- Sanchez Sabogal, F. (1982). Curso de laboratorio de pavimentos. Universidad del Cauca.
- Schrader, M. E. (1995). Young-Dupre Revisited. *Langmuir*, 11(9), 3585-3589. doi:10.1021/la00009a049
- Tan, Y., & Guo, M. (2013). Using surface free energy method to study the cohesion and adhesion of asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, 47, 254-260. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.067
- Van Oss, C. J. (1994). Interfacial Forces In Aqueous Media. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 64(3), 311-311. doi:10.1002/jctb.280640321
- Villegas Flores, N., Rondon, H. A., Sanchez, E., Miramontes, D., Cabascango, A. E., & Dalfré, G. (2014). Patologías de pavimentos asfálticos em climas extremos – Estudio de caso Brasil, México e Colombia. 43a Reunión Anual de Pavimentación. Recuperado a partir de <https://es.scribd.com/doc/245349084/Patologias-de-pavimentos-asfalticos-em-climas-extremos-Estudio-de-caso-Brasil-Mexico-e-Colombia>
- Wei, Z., Xu, H., Shaopeng, W., & Jizhe, Z. (2011). Effect of different anti stripping measures on adhesion between granite and asphalt. *2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)*, 258-261. doi:10.1109/ICETCE.2011.5776116
- Young, T. (1805). An Essay on the Cohesion of Fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95, 65-87.



## ANEXOS



Anexo 1 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado del Agregado 1 (Arenisca) obtenido de la zona de Mondoñedo en Condición Seca.

Punto	Tensile Strength (psi)	Ag	Tipo de falla	POTS (psi)	POTS (MPa)		
1	38,053	100,00%	Falla Cohesiva	37,47	0,26		
2	35,025	100,00%	Falla Cohesiva	34,44	0,24		
3	38,036	100,00%	Falla Cohesiva	37,45	0,26		
4	35,6554	100,00%	Falla Cohesiva	35,07	0,24		
5	43,6627	95,00%	Falla Cohesiva	40,89	0,28		
6	40,8609	100,00%	Falla Cohesiva	40,27	0,28		
7	35,6889	100,00%	Falla Cohesiva	35,10	0,24		
8	37,182	100,00%	Falla Cohesiva	36,59	0,25		
9	32,256	100,00%	Falla Cohesiva	31,67	0,22		
10	33,856	100,00%	Falla Cohesiva	33,27	0,23		
11	47,263	90,00%	Falla Cohesiva	41,95	0,29		
12	39,649	100,00%	Falla Cohesiva	39,06	0,27		
13	37,249	100,00%	Falla Cohesiva	36,66	0,25		
14	37,659	100,00%	Falla Cohesiva	37,07	0,26		
15	32,9563	100,00%	Falla Cohesiva	32,37	0,22		
16	30,8463	95,00%	Falla Cohesiva	28,72	0,20		
17	35,648	100,00%	Falla Cohesiva	35,06	0,24		
18	30,8463	100,00%	Falla Cohesiva	30,26	0,21		
19	34,055	100,00%	Falla Cohesiva	33,47	0,23		
20	30,8463	100,00%	Falla Cohesiva	30,26	0,21		
21	30,046	100,00%	Falla Cohesiva	29,46	0,20		
22	42,851	90,00%	Falla Cohesiva	37,98	0,26		
23	39,65	100,00%	Falla Cohesiva	39,06	0,27		
24	37,035	100,00%	Falla Cohesiva	36,45	0,25		
25	32,568	95,00%	Falla Cohesiva	30,35	0,21		
<b>POTS Prom. (MPa)</b>	<b>Desv. Std.</b>	<b>COV</b>	<b>Q1</b>	<b>Q3</b>	<b>Ri</b>	<b>Lim. inferior</b>	<b>Lim. superior</b>
<b>0,243</b>	0,026	0,107	0,220	0,260	0,040	0,160	0,320



Anexo 2 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado del Agregado 2 (Arenisca) obtenido de la zona del Alto la Laguna en Condición Seca.

Punto	Tensile Strength (psi)	Ag	Tipo de falla	POTS (psi)	POTS (MPa)
1	96,47	70,00%	Falla Adhesiva	66,94	0,46
2	87,6817	90,00%	Falla Cohesiva	78,33	0,54
3	81,294	100,00%	Falla Cohesiva	80,71	0,56
4	77,689	98,00%	Falla Cohesiva	75,55	0,52
5	73,688	100,00%	Falla Cohesiva	73,10	0,50
6	74,93	95,00%	Falla Cohesiva	70,60	0,49
7	79,934	100,00%	Falla Cohesiva	79,35	0,55
8	86,83	100,00%	Falla Cohesiva	86,24	0,59
9	76,819	100,00%	Falla Cohesiva	76,23	0,53
10	78,83	100,00%	Falla Cohesiva	78,24	0,54
11	81,822	75,00%	Falla Adhesiva	60,78	0,42
12	78,942	90,00%	Falla Cohesiva	70,46	0,49
13	75,843	100,00%	Falla Cohesiva	75,26	0,52
14	66,83	100,00%	Falla Cohesiva	66,24	0,46
15	75,043	90,00%	Falla Cohesiva	66,95	0,46
16	78,4747	100,00%	Falla Cohesiva	77,89	0,54
17	70,4718	85,00%	Falla Cohesiva	59,31	0,41
18	71,6686	90,00%	Falla Cohesiva	63,91	0,44
19	84,6446	95,00%	Falla Cohesiva	79,83	0,55
20	84,108	100,00%	Falla Cohesiva	83,52	0,58
21	79,0256	100,00%	Falla Cohesiva	78,44	0,54
22	78,235	95,00%	Falla Cohesiva	73,74	0,51
23	81,236	100,00%	Falla Cohesiva	80,65	0,56
24	82,136	100,00%	Falla Cohesiva	81,55	0,56
25	79,265	100,00%	Falla Cohesiva	78,68	0,54

POTS Prom. (MPa)	Desv. Std.	COV	Q1	Q3	Ri	Lim. inferior	Lim. superior
0,514	0,049	0,096	0,49	0,55	0,060	0,400	0,640



Anexo 3 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado del Agregado 3 (Caliza) obtenido del Rio Coello en Condición Seca.

Punto	Tensile Strength (psi)	Ag	Tipo de falla	POTS (psi)	POTS (MPa)		
1	121,691	80,00%	Falla Cohesiva	96,77	0,67		
2	111,25	80,00%	Falla Cohesiva	88,41	0,61		
3	105,356	90,00%	Falla Cohesiva	94,23	0,65		
4	105,36	85,00%	Falla Cohesiva	88,97	0,61		
5	117,256	80,00%	Falla Cohesiva	93,22	0,64		
6	105,245	90,00%	Falla Cohesiva	94,13	0,65		
7	109,256	85,00%	Falla Cohesiva	92,28	0,64		
8	112,248	85,00%	Falla Cohesiva	94,82	0,65		
9	119,368	90,00%	Falla Cohesiva	106,84	0,74		
10	106,269	95,00%	Falla Cohesiva	100,37	0,69		
11	107,256	90,00%	Falla Cohesiva	95,94	0,66		
12	105,469	95,00%	Falla Cohesiva	99,61	0,69		
13	117,265	80,00%	Falla Cohesiva	93,22	0,64		
14	112,145	85,00%	Falla Cohesiva	94,74	0,65		
15	110,26	90,00%	Falla Cohesiva	98,65	0,68		
16	102,598	100,00%	Falla Cohesiva	102,01	0,70		
17	108,021	90,00%	Falla Cohesiva	96,63	0,67		
18	109,235	95,00%	Falla Cohesiva	103,19	0,71		
19	107,034	95,00%	Falla Cohesiva	101,09	0,70		
20	104,026	95,00%	Falla Cohesiva	98,24	0,68		
21	105,236	90,00%	Falla Cohesiva	94,13	0,65		
22	109,248	85,00%	Falla Cohesiva	92,27	0,64		
23	108,265	90,00%	Falla Cohesiva	96,85	0,67		
24	110,035	85,00%	Falla Cohesiva	92,94	0,64		
25	108,025	90,00%	Falla Cohesiva	96,63	0,67		
<b>POTS Prom. (MPa)</b>	<b>Desv. Std.</b>	<b>COV</b>	<b>Q1</b>	<b>Q3</b>	<b>Ri</b>	<b>Lim. inferior</b>	<b>Lim. superior</b>
<b>0,664</b>	0,030	0,046	0,640	0,680	0,040	0,580	0,740



Anexo 4 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado del Agregado 1 (Arenisca) obtenido de la zona de Mondoñedo en Condición Húmeda.

Punto	Tensile Strength (psi)	Ag	Tipo de falla	POTS (psi)	POTS (MPa)		
1	48,235	95,00%	Falla Cohesiva	45,24	0,31		
2	45,236	100,00%	Falla Cohesiva	44,65	0,31		
3	48,214	100,00%	Falla Cohesiva	47,63	0,33		
4	45,239	100,00%	Falla Cohesiva	44,65	0,31		
5	53,021	75,00%	Falla Adhesiva	39,18	0,27		
6	50,2148	90,00%	Falla Cohesiva	44,61	0,31		
7	45,236	100,00%	Falla Cohesiva	44,65	0,31		
8	47,0389	90,00%	Falla Cohesiva	41,75	0,29		
9	42,154	100,00%	Falla Cohesiva	41,57	0,29		
10	43,0214	100,00%	Falla Cohesiva	42,43	0,29		
11	57,0214	75,00%	Falla Adhesiva	42,18	0,29		
12	49,236	95,00%	Falla Cohesiva	46,19	0,32		
13	47,236	100,00%	Falla Cohesiva	46,65	0,32		
14	47,145	100,00%	Falla Cohesiva	46,56	0,32		
15	42,0214	100,00%	Falla Cohesiva	41,43	0,29		
16	40,25	100,00%	Falla Cohesiva	39,66	0,27		
17	45,236	100,00%	Falla Cohesiva	44,65	0,31		
18	40,214	100,00%	Falla Cohesiva	39,63	0,27		
19	44,236	100,00%	Falla Cohesiva	43,65	0,30		
20	42,0025	100,00%	Falla Cohesiva	41,42	0,29		
21	40,236	100,00%	Falla Cohesiva	39,65	0,27		
22	46,236	100,00%	Falla Cohesiva	45,65	0,31		
23	42,365	98,00%	Falla Cohesiva	40,93	0,28		
24	41,022	100,00%	Falla Cohesiva	40,43	0,28		
25	40,225	100,00%	Falla Cohesiva	39,64	0,27		
<b>POTS Prom. (MPa)</b>	<b>Desv. Std.</b>	<b>COV</b>	<b>Q1</b>	<b>Q3</b>	<b>Ri</b>	<b>Lim. inferior</b>	<b>Lim. superior</b>
<b>0,296</b>	0,019	0,063	0,280	0,310	0,030	0,235	0,355





Anexo 5 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado del Agregado 2 (Arenisca) obtenido de la zona del Alto la Laguna en Condición Húmeda.

Punto	Tensile Strength (psi)	Ag	Tipo de falla	POTS (PSI)	POTS (Mpa)
1	95,9542	75,00%	Falla Adhesiva	71,38	0,49
2	97,8385	85,00%	Falla Cohesiva	82,58	0,57
3	95,7664	90,00%	Falla Cohesiva	85,60	0,59
4	95,1177	85,00%	Falla Cohesiva	80,26	0,55
5	97,343	90,00%	Falla Cohesiva	87,02	0,60
6	99,3699	95,00%	Falla Cohesiva	93,81	0,65
7	98,334	100,00%	Falla Cohesiva	97,75	0,67
8	96,3214	90,00%	Falla Cohesiva	86,10	0,59
9	98,7386	100,00%	Falla Cohesiva	98,15	0,68
10	98,1906	100,00%	Falla Cohesiva	97,60	0,67
11	96,3322	75,00%	Falla Adhesiva	71,66	0,49
12	97,7884	95,00%	Falla Cohesiva	92,31	0,64
13	100,843	100,00%	Falla Cohesiva	100,26	0,69
14	97,9276	100,00%	Falla Cohesiva	97,34	0,67
15	95,318	85,00%	Falla Cohesiva	80,43	0,55
16	96,388	90,00%	Falla Cohesiva	86,16	0,59
17	99,324	95,00%	Falla Cohesiva	93,77	0,65
18	96,396	100,00%	Falla Cohesiva	95,81	0,66
19	99,326	90,00%	Falla Cohesiva	88,81	0,61
20	100,315	100,00%	Falla Cohesiva	99,73	0,69
21	94,189	100,00%	Falla Cohesiva	93,60	0,65
22	95,125	75,00%	Falla Adhesiva	70,76	0,49
23	89,135	95,00%	Falla Cohesiva	84,09	0,58
24	92,125	100,00%	Falla Cohesiva	91,54	0,63
25	95,235	100,00%	Falla Cohesiva	94,65	0,65

POTS Prom. (MPa)	Desv. Std.	COV	Q1	Q3	Ri	Lim. inferior	Lim. superior
0,612	0,062	0,102	0,580	0,660	0,080	0,460	0,780



Anexo 6 Comportamiento de la Unión Asfalto-agregado del Agregado 3 (Caliza) obtenido del Rio Coello en Condición Húmeda.

Punto	Tensile Strength (psi)	Ag	Tipo de falla	POTS (PSI)	POTS (Mpa)		
1	111,11147	60,00%	Falla Adhesiva	66,08	0,46		
2	119,659716	35,00%	Falla Adhesiva	41,29	0,28		
3	117,4566	30,00%	Falla Adhesiva	34,65	0,24		
4	119,1338	30,00%	Falla Adhesiva	35,15	0,24		
5	115,978211	25,00%	Falla Adhesiva	28,41	0,20		
6	117,500669	25,00%	Falla Adhesiva	28,79	0,20		
7	115,854668	35,00%	Falla Adhesiva	39,96	0,28		
8	118,398107	50,00%	Falla Adhesiva	58,61	0,40		
9	116,315	45,00%	Falla Adhesiva	51,75	0,36		
10	119,855	50,00%	Falla Adhesiva	59,34	0,41		
11	117,4566	35,00%	Falla Adhesiva	40,52	0,28		
12	119,1338	45,00%	Falla Adhesiva	53,02	0,37		
13	115,978211	50,00%	Falla Adhesiva	57,40	0,40		
14	117,500669	40,00%	Falla Adhesiva	46,41	0,32		
15	115,546677	35,00%	Falla Adhesiva	39,85	0,27		
16	118,398107	40,00%	Falla Adhesiva	46,77	0,32		
17	115,006689	40,00%	Falla Adhesiva	45,42	0,31		
18	114,677	35,00%	Falla Adhesiva	39,55	0,27		
19	116,377	45,00%	Falla Adhesiva	51,78	0,36		
20	114,31765	45,00%	Falla Adhesiva	50,86	0,35		
21	118,849	40,00%	Falla Adhesiva	46,95	0,32		
22	114,451	35,00%	Falla Adhesiva	39,47	0,27		
23	119,1338	45,00%	Falla Adhesiva	53,02	0,37		
24	112,1095	45,00%	Falla Adhesiva	49,86	0,34		
25	113,125	40,00%	Falla Adhesiva	44,66	0,31		
<b>POTS Prom. (MPa)</b>	<b>Desv. Std.</b>	<b>COV</b>	<b>Q1</b>	<b>Q3</b>	<b>Ri</b>	<b>Lim. inferior</b>	<b>Lim. superior</b>
<b>0,317</b>	0,066	0,207	0,250	0,393	0,143	0,036	0,606



Anexo 7 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Asfalto sobre Agregado 1  
 (Mondoñedo)

PRUEBA	ÁNGULO(°)		DER-IZQ	ÁNGULO PROM.	DES V. STD.	COV
	IZQ.	DER.	< 3°	(°)		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	162,16 0	161,56 0	0,6	161,860		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	161,94 0	161,34 0	0,6	161,640		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	164,86 0	164,46 0	0,4	164,660		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	160,36 0	160,08 0	0,3	160,220		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	156,44 0	159,88 0	-3,4	158,160		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	159,70 0	159,74 0	0,0	159,720		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	159,80 0	159,60 0	0,2	159,700		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	155,98 0	155,22 0	0,8	155,600		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	155,14 0	155,06 0	0,1	155,100		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	155,14 0	155,22 0	-0,1	155,180	3,450	2,2 %
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	155,22 0	155,68 0	-0,5	155,450		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	156,18 0	155,86 0	0,3	156,020		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	163,62 0	165,26 0	-1,6	164,440		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	160,36 0	162,88 0	-2,5	161,620		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	155,06 0	157,62 0	-2,6	156,340		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	159,82 0	158,66 0	1,2	159,240		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	153,47 0	154,62 0	-1,1	154,045		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	159,21 0	160,74 8	-1,5	159,979		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	155,58 6	156,56 3	-1,0	156,074		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	153,58 0	154,98 0	-1,4	154,280		



Anexo 8 Continuación

PRUEBA	ÁNGULO(°)		DER-IZQ < 3°	ÁNGULO PROM. (°)	DES V. STD.	COV
	IZQ.	DER.				
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	152,55 0	154,10 0	-1,5	153,325		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	156,45 5	157,40 8	-1,0	156,931		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	153,81 3	156,23 0	-2,4	155,021		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	153,84 0	155,84 5	-2,0	154,843		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	155,97 5	156,88 3	-0,9	156,429		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	155,92 0	157,48 0	-1,6	156,700		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	156,61 5	158,79 8	-2,2	157,706		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	157,53 5	158,55 9	-1,0	158,047		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	158,66 0	159,60 3	-0,9	159,131		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	160,38 0	161,61 5	-1,2	160,998		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	157,72 0	158,86 5	-1,1	158,293		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	158,44 0	159,84 5	-1,4	159,143		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	153,68 0	151,14 8	2,5	152,414		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	156,92 0	156,01 6	0,9	156,468		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	158,28 0	156,99 5	1,3	157,638		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	158,31 0	156,78 5	1,5	157,548		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	157,98 0	156,60 0	1,4	157,290		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	146,20 0	146,44 0	-0,2	146,320		
Asfalto 60-70 / Agregado 1 (Mondoñedo)	152,76 0	152,46 0	0,3	152,610		
PROMEDIO				156		



Anexo 9 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Asfalto sobre Agregado 2 (Alto la Laguna)

PRUEBA	ÁNGULO(°)		DE R-IZQ < 3°	ÁNGULO PROM. (°)	DESV . STD.	COV
	IZQ.	DER.				
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	154,8 20	154,3 20	0,5	154,570	3,534	2,2 %
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	155,2 80	156,3 98	-1,1	155,839		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	160,3 00	161,4 50	-1,2	160,875		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	157,8 43	158,9 80	-1,1	158,411		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	162,3 20	163,0 20	-0,7	162,670		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	160,4 10	162,1 73	-1,8	161,291		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	159,7 00	161,0 45	-1,3	160,373		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	160,7 80	162,3 35	-1,6	161,558		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	160,6 40	162,1 00	-1,5	161,370		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	162,8 40	163,9 60	-1,1	163,400		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	156,2 55	157,7 20	-1,5	156,988		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	152,5 60	151,9 20	0,6	152,240		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	152,2 50	153,3 80	-1,1	152,815		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	159,9 20	160,7 80	-0,9	160,350		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	149,3 00	147,6 28	1,7	148,464		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	160,2 10	159,2 15	1,0	159,713		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	160,1 80	161,1 80	-1,0	160,680		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	158,5 20	157,6 00	0,9	158,060		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	160,4 80	161,5 30	-1,0	161,005		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	155,4 20	156,4 60	-1,0	155,940		



Anexo 10 Continuación

PRUEBA	ÁNGULO(°)		DE R- IZQ < 3°	ÁNGUL O PROM. (°)	DESV . STD.	COV
	IZQ.	DER.				
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	159,6 80	161,2 20	-1,5	160,450		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	159,2 40	160,4 80	-1,2	159,860		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	165,7 60	163,3 00	2,5	164,530		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	158,6 30	160,0 00	-1,4	159,315		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	163,3 60	164,7 00	-1,3	164,030		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	158,7 20	160,3 00	-1,6	159,510		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	157,6 58	158,4 00	-0,7	158,029		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	163,8 40	165,4 10	-1,6	164,625		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	157,5 00	158,7 00	-1,2	158,100		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	160,7 50	159,2 60	1,5	160,005		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	161,2 25	158,5 53	2,7	159,889		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	161,5 40	160,1 10	1,4	160,825		
Asfalto 60-70 / Agregado 2 (Alto la Laguna)	160,3 30	158,3 20	2,0	159,325		
PROMEDIO				159		



Anexo 11 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Asfalto sobre Agregado 3 (Rio Coello)

PRUEBA	ÁNGULO(°)		DER -IZQ < 3°	ÁNGULO O PROM. (°)	DES V. STD.	COV
	IZQ.	DER.				
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	161,2 60	160,5 20	0,7	160,890		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	159,2 20	158,7 60	0,5	158,990		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	165,6 60	164,6 40	1,0	165,150		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	166,7 60	166,5 80	0,2	166,670		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	160,8 60	161,2 20	-0,4	161,040		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	154,1 60	153,0 00	1,2	153,580		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	154,1 40	154,8 40	-0,7	154,490		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	161,7 20	163,3 40	-1,6	162,530		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	163,2 90	162,1 00	1,2	162,695		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	161,6 40	163,1 30	-1,5	162,385		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	160,9 60	162,4 00	-1,4	161,680	3,048	1,9 %
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	155,2 60	154,0 70	1,2	154,665		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	161,6 60	160,3 75	1,3	161,018		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	161,6 40	163,1 30	-1,5	162,385		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	165,2 20	165,9 80	-0,8	165,600		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	158,5 80	159,7 40	-1,2	159,160		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	161,9 85	161,4 48	0,5	161,716		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	162,0 40	160,6 30	1,4	161,335		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	162,9 60	163,5 40	-0,6	163,250		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	160,5 00	160,9 60	-0,5	160,730		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	159,2 60	157,5 00	1,8	158,380		



Anexo 12 Continuación

PRUEBA	ÁNGULO(°)		DER -IZQ	ÁNGUL O PROM. (°)	DES V. STD.	COV
	IZQ.	DER.	< 3°			
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	161,8 20	163,6 10	-1,8	162,715		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	160,5 00	158,9 70	1,5	159,735		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	160,7 00	162,2 50	-1,6	161,475		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	159,5 65	161,8 20	-2,3	160,693		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	162,3 24	163,7 90	-1,5	163,057		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	160,8 43	162,7 15	-1,9	161,779		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	162,4 40	163,3 25	-0,9	162,883		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	163,1 00	167,1 20	-4,0	165,110		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	169,1 00	168,5 80	0,5	168,840		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	164,8 50	162,7 40	2,1	163,795		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	166,0 60	163,9 80	2,1	165,020		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	165,6 75	164,3 80	1,3	165,028		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	157,1 60	156,7 40	0,4	156,950		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	161,9 20	160,6 88	1,2	161,304		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	160,5 65	162,0 60	-1,5	161,313		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	154,4 85	156,9 60	-2,5	155,723		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	159,9 60	161,5 00	-1,5	160,730		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	160,6 60	162,0 90	-1,4	161,375		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	161,2 40	163,4 20	-2,2	162,330		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	158,0 40	158,1 40	-0,1	158,090		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	159,6 60	158,7 35	0,9	159,198		





Anexo 13 Continuación

PRUEBA	ÁNGULO(°)		DER -IZQ < 3°	ÁNGUL O PROM. (°)	DES V. STD.	COV
	IZQ.	DER.				
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	160,9 40	163,0 40	-2,1	161,990		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	162,4 00	161,2 90	1,1	161,845		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	163,1 95	160,7 10	2,5	161,953		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	163,5 00	162,2 05	1,3	162,853		
Asfalto 60-70 / Agregado 3 (Rio Coello)	161,1 00	159,8 70	1,2	160,485		
PROMEDIO				161		



Anexo 14 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Formamida sobre Asfalto

PRUEBA	ÁNGULO (°)		DER-IZQ < 3°	ÁNGULO PROM. (°)	DESV . EST.	COV
	IZQ.	DER.				
Formamida / Lamina Asfalto	105,40	105,04	0,4	105,2	1,387	1,3 %
Formamida / Lamina Asfalto	105,74	104,20	1,5	105,0		
Formamida / Lamina Asfalto	107,20	107,16	0,0	107,2		
Formamida / Lamina Asfalto	104,74	103,82	0,9	104,3		
Formamida / Lamina Asfalto	103,22	103,04	0,2	103,1		
Formamida / Lamina Asfalto	105,59	105,98	-0,4	105,8		
Formamida / Lamina Asfalto	105,89	105,71	0,2	105,8		
Formamida / Lamina Asfalto	107,33	106,92	0,4	107,1		
Formamida / Lamina Asfalto	105,02	105,00	0,0	105,0		
Formamida / Lamina Asfalto	103,39	103,12	0,3	103,3		
PROMEDIO				105,18		

Anexo 15 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Formamida sobre Agregado 1 (Mondoñedo)

PRUEBA	ÁNGULO (°)		DER-IZQ < 3°	ÁNGULO PROM. (°)	DESV . EST.	COV
	IZQ.	DER.				
Formamida / Agregado 1 (Mondoñedo)	20,5	22,59	-2,1	21,5	1,157	5,8 %
Formamida / Agregado 1 (Mondoñedo)	18,7	18,255	0,4	18,5		
Formamida / Agregado 1 (Mondoñedo)	20,7	21,06	-0,3	20,9		
Formamida / Agregado 1 (Mondoñedo)	21,2	20,18	1,0	20,7		
Formamida / Agregado 1 (Mondoñedo)	20,7	20,02	0,7	20,4		
Formamida / Agregado 1 (Mondoñedo)	19,7	19,1	0,6	19,4		
Formamida / Agregado 1 (Mondoñedo)	18,9	18,58	0,4	18,8		
PROMEDIO				20,01		



Anexo 16 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Formamida sobre Agregado 2 (Alto la Laguna)

PRUEBA	ÁNGULO (°)		DER-IZQ < 3°	ÁNGULO PROM. (°)	DESV. EST.	COV
	IZQ.	DE R.				
Formamida / Agregado 2 (Alto la Laguna)	23,26	23,58	-0,3	23,4	1,066	4,7%
Formamida / Agregado 2 (Alto la Laguna)	23,56	23,77	-0,2	23,7		
Formamida / Agregado 2 (Alto la Laguna)	22,76	23,04	-0,3	22,9		
Formamida / Agregado 2 (Alto la Laguna)	21,54	22,04	-0,5	21,8		
Formamida / Agregado 2 (Alto la Laguna)	20,94	20,49	0,4	20,7		
Formamida / Agregado 2 (Alto la Laguna)	23,18	23,46	-0,3	23,3		
Formamida / Agregado 2 (Alto la Laguna)	23,54	24,2	-0,7	23,9		
Formamida / Agregado 2 (Alto la Laguna)	22,63	23,37	-0,7	23,0		
PROMEDIO				22,84		

Anexo 17 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Formamida sobre Agregado 3 (Rio Coello)

PRUEBA	ÁNGULO (°)		DER-IZQ < 3°	ÁNGULO PROM. (°)	DESV. EST.	COV
	IZQ.	DE R.				
Formamida / Agregado 3 (Rio Coello)	34,14	34,67	-0,5	34,4	1,977	6,2%
Formamida / Agregado 3 (Rio Coello)	28,06	28,77	-0,7	28,4		
Formamida / Agregado 3 (Rio Coello)	31,99	31,48	0,5	31,7		
Formamida / Agregado 3 (Rio Coello)	32,23	31,9	0,4	32,0		
Formamida / Agregado 3 (Rio Coello)	32,96	32,42	0,5	32,7		
Formamida / Agregado 3 (Rio Coello)	30,99	31,25	-0,3	31,1		
PROMEDIO				31,74		



**Anexo 18 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Etilenglicol sobre Asfalto**

PRUEBA	ÁNGULO (°)		DER-IZQ < 3°	ÁNGULO PROM. (°)	DESV. EST.	COV
	IZQ.	DER.				
Etilenglicol / Lamina Asfalto	100,2 5	101,0 8	-0,8	100,7	1,381	1,3 %
Etilenglicol / Lamina Asfalto	105,8 8	104,6 8	1,2	105,3		
Etilenglicol / Lamina Asfalto	104,3 2	103,5 1	0,8	103,9		
Etilenglicol / Lamina Asfalto	104,1 0	105,0 0	-0,9	104,6		
Etilenglicol / Lamina Asfalto	103,7 8	102,9 2	0,9	103,3		
Etilenglicol / Lamina Asfalto	105,6 6	104,7 6	0,9	105,2		
Etilenglicol / Lamina Asfalto	104,3 2	103,5 1	0,8	103,9		
Etilenglicol / Lamina Asfalto	104,1 0	105,0 0	-0,9	104,6		
Etilenglicol / Lamina Asfalto	103,7 8	102,9 2	0,9	103,3		
Etilenglicol / Lamina Asfalto	105,6 6	104,7 6	0,9	105,2		
PROMEDIO				104,00		

**Anexo 19 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Etilenglicol sobre Agregado 1 (Mondoñedo)**

PRUEBA	ÁNGULO (°)		DER-IZQ < 3°	ÁNGULO PROM. (°)	DESV. EST.	COV
	IZQ.	DER.				
Etilenglicol / Agregado 1 (Mondoñedo)	9,86	10,14	-0,3	10,0	0,648	6,2 %
Etilenglicol / Agregado 1 (Mondoñedo)	9,54	9,33	0,2	9,4		
Etilenglicol / Agregado 1 (Mondoñedo)	10,36	10,24	0,1	10,3		
Etilenglicol / Agregado 1 (Mondoñedo)	10,52	10,69	-0,2	10,6		
Etilenglicol / Agregado 1 (Mondoñedo)	11,06	11,14	-0,1	11,1		
Etilenglicol / Agregado 1 (Mondoñedo)	10,54	11,03	-0,5	10,8		
Etilenglicol / Agregado 1 (Mondoñedo)	11,16	11,44	-0,3	11,3		
PROMEDIO				10,50		



Anexo 20 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Etilenglicol sobre Agregado 2 (Alto la Laguna)

PRUEBA	ÁNGULO (°)		DER-IZQ < 3°	ÁNGULO PROM. (°)	DESV . EST.	COV
	IZQ.	DER.				
Etilenglicol/ Agregado 2 (Alto la Laguna)	21,80	22,58	-0,8	22,2	0,963	4,2 %
Etilenglicol/ Agregado 2 (Alto la Laguna)	22,84	23,23	-0,4	23,0		
Etilenglicol/ Agregado 2 (Alto la Laguna)	24,01	23,17	0,8	23,6		
Etilenglicol/ Agregado 2 (Alto la Laguna)	24,01	23,54	0,5	23,8		
Etilenglicol/ Agregado 2 (Alto la Laguna)	23,83	23,34	0,5	23,6		
Etilenglicol/ Agregado 2 (Alto la Laguna)	21,42	21,03	0,4	21,2		
Etilenglicol/ Agregado 2 (Alto la Laguna)	22,12	22,24	-0,1	22,2		
Etilenglicol/ Agregado 2 (Alto la Laguna)	22,24	22,60	-0,4	22,4		
Etilenglicol/ Agregado 2 (Alto la Laguna)	24,03	24,33	-0,3	24,2		
PROMEDIO				22,91		

Anexo 21 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Etilenglicol sobre Agregado 3 (Rio Coello)

PRUEBA	ÁNGULO (°)		DER-IZQ < 3°	ÁNGULO PROM. (°)	DESV . EST.	COV
	IZQ.	DER.				
Etilenglicol / Agregado 3 (Rio Coello)	35,36	36,3	-0,9	35,8	1,939	5,6 %
Etilenglicol / Agregado 3 (Rio Coello)	36,03	36,4	-0,4	36,2		
Etilenglicol / Agregado 3 (Rio Coello)	38,62	36,3	2,3	37,5		
Etilenglicol / Agregado 3 (Rio Coello)	34,58	32,8	1,8	33,7		
Etilenglicol / Agregado 3 (Rio Coello)	35,02	32,7	2,3	33,9		
Etilenglicol / Agregado 3 (Rio Coello)	30,61	32,7	-2,1	31,7		
Etilenglicol / Agregado 3 (Rio Coello)	34,37	33,8	0,6	34,1		
PROMEDIO				34,69		



Anexo 22 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Agua Desionizada sobre Asfalto

PRUEBA	ÁNGULO (°)		DER - IZQ < 3°	ÁNGULO PROM. (°)	DESV. EST.	CO V
	IZQ.	DER.				
Agua Desionizada / Lamina Asfalto	104,90	103,94	1,0	104,4	0,854	0,8 %
Agua Desionizada / Lamina Asfalto	105,04	105,42	-0,4	105,2		
Agua Desionizada / Lamina Asfalto	103,82	103,84	0,0	103,8		
Agua Desionizada / Lamina Asfalto	104,54	104,70	-0,2	104,6		
Agua Desionizada / Lamina Asfalto	103,98	103,47	0,5	103,7		
Agua Desionizada / Lamina Asfalto	103,22	102,52	0,7	102,9		
Agua Desionizada / Lamina Asfalto	103,34	102,50	0,8	102,9		
Agua Desionizada / Lamina Asfalto	102,25	103,16	-0,9	102,7		
Agua Desionizada / Lamina Asfalto	103,82	103,84	0,0	103,8		
Agua Desionizada / Lamina Asfalto	104,54	104,70	-0,2	104,6		
PROMEDIO				103,88		



Anexo 23 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Agua Desionizada sobre Agregado 1  
 (Mondoñedo)

PRUEBA	ÁNGULO (°)		DER- IZQ < 3°	ÁNGULO PROM. (°)	DESV . EST.	COV
	IZQ.	DER.				
Agua Desionizada / Agregado 1 (Mondoñedo)	17,47	17,38	0,1	17,4		
Agua Desionizada / Agregado 1 (Mondoñedo)	16,82	17,48	-0,7	17,1		
Agua Desionizada / Agregado 1 (Mondoñedo)	19,33	18,89	0,4	19,1		
Agua Desionizada / Agregado 1 (Mondoñedo)	18,70	18,54	0,2	18,6		
Agua Desionizada / Agregado 1 (Mondoñedo)	18,24	18,14	0,1	18,2		
Agua Desionizada / Agregado 1 (Mondoñedo)	17,60	17,82	-0,2	17,7		
Agua Desionizada / Agregado 1 (Mondoñedo)	17,88	18,24	-0,4	18,1	0,826	4,5%
Agua Desionizada / Agregado 1 (Mondoñedo)	17,80	18,39	-0,6	18,1		
Agua Desionizada / Agregado 1 (Mondoñedo)	17,90	18,62	-0,7	18,3		
Agua Desionizada / Agregado 1 (Mondoñedo)	17,00	18,75	-1,8	17,9		
Agua Desionizada / Agregado 1 (Mondoñedo)	20,45	18,71	1,7	19,6		
Agua Desionizada / Agregado 1 (Mondoñedo)	19,84	19,67	0,2	19,8		
Agua Desionizada / Agregado 1 (Mondoñedo)	17,52	17,09	0,4	17,3		
PROMEDIO				18,24		



Anexo 24 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Agua Desionizada sobre Agregado 2  
 (Alto la Laguna)

PRUEBA	ÁNGULO (°)		DER -IZQ < 3°	ÁNGULO PROM. (°)	DESV. EST.	COV
	IZQ.	DER.				
Agua Desionizada / Agregado 2 (Alto la Laguna)	27,72	25,94	1,8	26,8		
Agua Desionizada / Agregado 2 (Alto la Laguna)	25,47	26,21	-0,7	25,8		
Agua Desionizada / Agregado 2 (Alto la Laguna)	26,18	25,77	0,4	26,0		
Agua Desionizada / Agregado 2 (Alto la Laguna)	27,29	28,02	-0,7	27,7		
Agua Desionizada / Agregado 2 (Alto la Laguna)	26,67	27,06	-0,4	26,9		
Agua Desionizada / Agregado 2 (Alto la Laguna)	25,61	26,15	-0,5	25,9		
Agua Desionizada / Agregado 2 (Alto la Laguna)	26,10	26,79	-0,7	26,4	0,936	3,5%
Agua Desionizada / Agregado 2 (Alto la Laguna)	28,48	28,88	-0,4	28,7		
Agua Desionizada / Agregado 2 (Alto la Laguna)	27,35	26,88	0,5	27,1		
Agua Desionizada / Agregado 2 (Alto la Laguna)	26,58	27,24	-0,7	26,9		
Agua Desionizada / Agregado 2 (Alto la Laguna)	28,19	28,62	-0,4	28,4		
Agua Desionizada / Agregado 2 (Alto la Laguna)	27,75	27,94	-0,2	27,8		
Agua Desionizada / Agregado 2 (Alto la Laguna)	27,63	28,00	-0,4	27,8		
PROMEDIO				27,10		





Anexo 25 Formato Chequeo Ángulo de Contacto de Agua Desionizada sobre Agregado 3 (Rio Coello)

PRUEBA	ÁNGULO (°)		DER-IZQ < 3°	ÁNGULO PROM. (°)	DESV. EST.	COV
	IZQ.	DER.				
Agua Desionizada / Agregado 3 (Rio Coello)	28,12	28,62	-0,5	28,4		
Agua Desionizada / Agregado 3 (Rio Coello)	32,23	32,91	-0,7	32,6		
Agua Desionizada / Agregado 3 (Rio Coello)	32,70	33,46	-0,8	33,1		
Agua Desionizada / Agregado 3 (Rio Coello)	29,76	29,20	0,6	29,5		
Agua Desionizada / Agregado 3 (Rio Coello)	31,49	31,98	-0,5	31,7	1,801	5,8%
Agua Desionizada / Agregado 3 (Rio Coello)	33,01	33,40	-0,4	33,2		
Agua Desionizada / Agregado 3 (Rio Coello)	29,74	29,96	-0,2	29,9		
Agua Desionizada / Agregado 3 (Rio Coello)	29,36	29,20	0,2	29,3		
Agua Desionizada / Agregado 3 (Rio Coello)	31,72	31,26	0,5	31,5		
PROMEDIO				31,01		

Anexo 26 Ejemplo de Rutina de Cálculo de las Componentes Polar y Apolar y de la Energía Superficial Libre Total

**Calculo de la Energía superficial de los Líquidos sobre Agregado 1**

Matriz A			
	$\gamma^{LW}$	$\gamma^{L+}$	$\gamma^{L-}$
FORMAMIDA	6,204836823	1,516575089	6,292853089
ETHYLEN GLYCOL	5,385164807	1,385640646	6,8556546
DESIONIZED WATER	4,669047012	5,049752469	5,049752469

$$A = \begin{bmatrix} \sqrt{\gamma_{li}^{LW}} & \sqrt{\gamma_{li}^+} & \sqrt{\gamma_{li}^-} \\ \dots & \dots & \dots \\ \sqrt{\gamma_{bm}^{LW}} & \sqrt{\gamma_{bm}^+} & \sqrt{\gamma_{bm}^-} \end{bmatrix}_{mx3}$$
  

Matriz B	
FORMAMIDA	55,7638943
ETHYLEN GLYCOL	47,59784511
DESIONIZED WATER	70,97092703

$$x = \begin{bmatrix} \sqrt{\gamma_s^{LW}} \\ \sqrt{\gamma_s^-} \\ \sqrt{\gamma_s^+} \end{bmatrix}_{3x1}$$
  

Matriz x	
RAIZ(CANTERA 1 LW)	8,114713218
RAIZ(CANTERA 1 -)	7,498218551
RAIZ(CANTERA 1 +)	-0,946818313

CANTERA 1 LW	65,8485706
CANTERA 1 -	56,22328145
CANTERA 1 +	0,896464918

$$B = 0.5 \begin{bmatrix} \gamma_{li}(1 + \text{Cos } \theta_1) \\ \dots \\ \gamma_{li}(1 + \text{Cos } \theta_m) \end{bmatrix}_{mx1}$$
  

$$ESL = \gamma = \gamma^{LW} + \gamma^{AB} = \gamma^{LW} + 2\sqrt{\gamma^+ * \gamma^-}$$

$\gamma^{LW} =$	65,8485706
$\gamma^{AB} =$	14,19890128
$\gamma$ CANTERA 1 =	<b>80,04747189</b>