

ADITIVO ORGANOSILANO MULTI-PROMOTOR DE ADHERENCIA (MPA) PARA
ASFALTOS

Estudio fisicoquímico del aditivo promotor de adherencia para el asfalto de base
organosilano desarrollado por la empresa MULTINSA

Nicolle Urzola Mier

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Química
(modalidad de práctica empresarial)

Director(a)

Ronald Alfonso Mercado Ojeda

P.hD en Ingeniería de Productos y Procesos

Co-directores(as)

Carlos Andrés Hernández B.

P.hD en Ingeniería Química

Robinson Hernández Roa

Ing. Químico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga (Santander)

2025

Dedicatorias

El título de Ingeniera Química lo tendré por propios méritos; sin embargo, detrás de mí hay una madre luchadora que jamás me dejó desfallecer, que trasnocho conmigo que madrugo conmigo que en cada caída me extendía sus brazos para alzarme y ella más que nadie sabe el camino tan duro que fue el llegar a esta meta; un abuelo que desde que comencé mi carrera ya me decía ingeniería; su casa la convertí en un centro de estudio con mis compañeros que por él soy lo que soy. A unos padres que gracias a Dios soy bendecida y no cuento con uno si no con varios han estado ahí siempre para mí queriendo lo mejor, a mi familia gracias por creer siempre en mí, a mis amigos y compañeros de este largo camino gracias por tantas palabras de aliento todas fueron muy importantes para mí, gracias a los angelitos que tengo en el cielo los amo y espero que estén orgullosos de mí. Por último, el que siempre está delante de mí y que todo fue por su gracia y su favor gracias, Dios por darme la sabiduría y el entendimiento de haber llegado hasta aquí.

Tabla de contenido

Introducción	9
1. Objetivos	13
1.1. Objetivo general	13
1.2. Objetivos específicos.....	13
3. Marco conceptual	14
4. Metodología.....	16
4.1. Enfoque metodológico.....	16
4.2. Tipo de investigación	16
4.3. Materiales, equipos y métodos de ensayo de laboratorio	17
4.4. Procedimiento.....	18
4.4.1. Fase metodológica 1	18
4.4.2. Fase metodológica 2.....	19
4.4.3. Fase metodológica 3.....	19
5. Resultados	20
5.1. Evaluación del efecto de concentraciones de aditivos objeto de estudio.....	20
5.1.1. Prueba de penetración (INVIAS 706).....	20
5.1.2. Prueba de viscosidad (INVIAS 717).....	21
5.1.2. Prueba de ablandamiento (INVIAS 712).....	22
5.1.4. Prueba de Riedel Weber (INVIAS 774)	23
5.1.5. Prueba de agua hervida	24
5.1. Cambios fisicoquímicos en interfase asfalto-agregado (aditivo Multinsa)	24
5.3. Medición y evaluación del ángulo de contacto	26
5.3.1. Ángulo de contacto para aditivo comercial	26
5.3.2. Ángulo de contacto para aditivo MPA	28
5.3.3. Análisis de tensión superficial	29
5.3.4. Dinámica de la tensión superficial con aditivo comercial	29
5.3.5. Dinámica de la tensión superficial con aditivo MPA	29
5.4. Desviación Estándar	30
5.5. Espectroscopía Infrarroja.....	31
5.6. Comparativo de desempeño de aditivo Multinsa vs aditivo comercial.....	32
6. Conclusiones	35
6. Recomendaciones	37
Referencias Bibliográficas	38
Apéndices.....	40

Lista de Tablas

Tabla 1. Materiales, equipos y métodos de ensayo de laboratorio.	17
Tabla 2. Condiciones experimentales del ensayo de laboratorio: diseño factorial 2X2.	18
Tabla 3. Prueba de Riedel Weber: Aditivo MPA a 0,07%.	23
Tabla 4. Prueba de Riedel Weber: Comercial a 0,07%.	24
Tabla 5. Desviación estandar a distintas concentraciones	30

Lista de Figuras

Figura 1. Análisis comparativo: Prueba de penetración (INVIAS 706)	20
Figura 2. Análisis comparativo: Prueba de viscosidad (INVIAS 717).....	21
Figura 3. Análisis comparativo: Prueba de ablandamiento (INVIAS 712).	22
Figura 4. Dinámica adhesiva de asfalto con aditivo comercial: Piedra caliza.....	26
Figura 5. Dinámica adhesiva de asfalto con aditivo comercial: Piedra sílice.....	27
Figura 6. Laboratorio de ángulo de contacto para aditivo MPA.....	28
Figura 7. Dinámica de la tensión superficial con aditivo MPA.....	30
Figura 8. Espectroscopía infrarroja.....	31
Figura 9. Comparativo de composición de elementos y compuestos químicos mayoritarios.	33
Figura 10. Comparativo de composición de elementos y compuestos químicos minoritarios....	34

Lista de Apéndices

Apéndice A. Laboratorio de energía libre superficial: ángulo de contacto - tensión superficial.	40
Apéndice B. Laboratorio de composición química por tipo de agregado mineral.....	63
Apéndice C. Ensayo de prueba de agua hirviendo (INVIAS 757).	67

Resumen

Título: Estudio fisicoquímico del aditivo promotor de adherencia para el asfalto de base organosilano desarrollado por la empresa Multiservicios de Ingeniería S.A.

Autor: Nicolle Urzola Mier.

Palabras clave: Adherencia, aditivo, asfalto y agregado pétreo.

El presente ejercicio estuvo orientado en estudiar el mecanismo fisicoquímico a través del cual el aditivo multi-promotor de adherencia (MPA) mejora la adhesión entre materiales pétreos (caliza y silicio) y asfalto referencia comercial 60/70. Lo anterior, en respuesta a la necesidad de optimizar la calidad de la mezcla asfáltica para el desarrollo de proyectos viales en condiciones de factibilidad y viabilidad, conforme con las normativas expuestas por Instituto Nacional de Vías (INVIAS). De conformidad con los resultados obtenidos, se seleccionó como mezcla asfáltica el aditivo MPA con 0,03% de concentración, ángulo de contacto adecuado y concentraciones asociadas con el agregado petreo silicio. En cuanto a los cambios fisicoquímicos en interfase asfalto-agregado, se logró establecer que la concentración de aditivo comercial para asfalto 60/70 (piedra caliza), es de 0,07% (105°). No obstante, la piedra sílice, obtuvo una mejor concentración a 0,07% aditivo comercial (116°); por lo tanto, el aditivo comercial tiene mejor comportamiento adhesivo con la piedra caliza comparado con el agregado de sílice. Cabe destacar que, la adhesión es mayor en aditivo comercial a 0,05% con piedra caliza, en comparación con aditivo MPA a 0,05% con piedra sílice, respectivamente. Al analizar las composiciones porcentuales de elementos y compuestos químicos de los agregados minerales objeto de estudio, se logra reconocer que el óxido de zinc (piedra caliza) ofrece propiedades adhesivas y repelentes a la humedad.

Palabras clave: asfalto, adhesión, aditivo, piedra caliza y piedra sílice.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Programa académico. Director: Ronald Alfonso Mercado Ojeda. P.hD en Ingeniería de Productos y Procesos. Codirector: Carlos Andrés Hernández B. P.hD en Ingeniería Química. Robinson Hernández Roa. Ing. Químico.

Abstract

Title: Physicochemical study of the adhesion promoting additive for organosilane-based asphalt developed by the company Multiservicios de Ingeniería S.A.

Author: Nicolle Urzola Mier.

Keywords: Adhesion, additive, asphalt and stone aggregate.

This study aimed to analyze the physicochemical mechanism through which the multi-adhesion promoter additive (MPA) enhances the adhesion between aggregate materials (limestone and silica) and asphalt of commercial reference 60/70. This research responds to the need to optimize the quality of asphalt mixtures for road development projects under feasible and viable conditions, in accordance with the regulations established by the National Institute of Roads (INVIAS).

Based on the obtained results, the selected asphalt mixture contained the MPA additive at a concentration of 0.03%, with an appropriate contact angle and concentrations associated with the silica aggregate. Regarding the physicochemical changes at the asphalt-aggregate interface, it was determined that the commercial additive concentration for 60/70 asphalt (limestone) is 0.07% (105°). However, silica stone achieved a better concentration at 0.07% commercial additive (116°). Therefore, the commercial additive exhibits better adhesive performance with limestone compared to silica aggregate.

Notably, adhesion is greater when using the commercial additive at 0.05% with limestone than when using the MPA additive at 0.05% with silica stone. Analyzing the percentage composition of elements and chemical compounds in the studied mineral aggregates reveals that zinc oxide (limestone) provides adhesive properties and moisture resistance.

Keywords: asphalt, adhesion, additive, limestone and silica stone.

* Degree Work

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Programa académico. Director: Ronald Alfonso Mercado Ojeda. P.hD en Ingeniería de Productos y Procesos. Codirector: Carlos Andrés Hernández B. P.hD en Ingeniería Química. Robinson Hernández Roa. Ing. Químico.

Introducción

Colombia es uno de los países con mayor producción de petróleo en Latinoamérica, su refinería más grande está localizada en Barrancabermeja y el comercio del distrito en su mayoría gira en torno al petróleo y sus subproductos. El petróleo es una mezcla compleja de hidrocarburos mediante el cual por un proceso de destilación fraccionada separa los componentes respecto a su punto de ebullición. Como principales subproductos obtenidos de este proceso se destacan aceites lubricantes, diésel, queroseno, gasolina, gas propano y los residuos del petróleo, en este se encuentra el asfalto que pertenece a la parte más pesada del crudo y donde se emplea la mayor temperatura de destilación.

Multinsa es una empresa barranqueña productora y comercializadora de productos petroquímicos desde el año 1998 hasta la actualidad se dedica a comprarle asfalto a Ecopetrol para transformarlo y comercializarlo. A principios de los años 2.000 se comenzó a indagar a nivel internacional y nacional sobre un aditivo *anti-stripping* dado que, las vías se observaban desgastes ocasionados por diversos factores, entre estos la humedad. Colombia por ser una zona tropical y altos niveles de precipitación, es recurrente el daño de las mezclas asfálticas. Es de vital importancia la interacción fisicoquímica que existe entre el asfalto y el material pétreo para una mejor calidad de la mezcla asfáltica. La vida útil del pavimento depende de las propiedades fisicoquímicas y los materiales que lo constituyen, así como de otros factores como el diseño de mezcla (materiales seleccionados, contenido de vacíos y de asfalto), su producción y construcción, factores ambientales, entre otros.

Por las razones mencionadas anteriormente la empresa MULTINSA en sus inicios empezó a comprar un aditivo comercial de origen organosilano el cual posee la propiedad de modificar de forma permanente la superficie de los agregados ya que en él se encuentran puentes

reactivas y los vuelve químicamente compatibles con el asfalto, pero su alto costo de adquisición condujo al equipo de investigación a buscar compuestos químicos que tuvieran afinidad con el asfalto, pero sin perder la afinidad con los agregados. Durante años de investigación se logró conseguir el promotor de adherencia MPA desarrollado en el 2.019 por la empresa, el cual presenta un comportamiento similar al aditivo comercial ya que provienen del mismo origen organosilano, este aditivo minimiza costos y le da un valor agregado a la empresa ya que es propio.

A pesar de saber que el aditivo cumple con su rol de mejorar la adherencia no se conoce con claridad el mecanismo fisicoquímico que influye en la mejora de la calidad del asfalto. Como interrogante a resolver a lo largo de la investigación queda ¿cuál es el mecanismo fisicoquímico a través del cual el aditivo MULTINSA mejora la adherencia entre el asfalto y el agregado?

Presentación de la empresa

Multinsa 1A es una empresa con 29 años de existencia fundada por el ingeniero Nilson Ahumada. La empresa cuenta con cuatro líneas de negocio donde el pilar más importante de estas es colaborar con el medio ambiente, por esto se trabaja con productos innovadores y de la más alta calidad. La línea hogar que abarca productos de limpieza y desinfección, la línea de aditivos para vehículos los cuales ayudan a potencializar el motor y reducir la emisión de gases contaminantes. La línea industrial la cual es la encargada de brindar soluciones a diferentes problemáticas que se presentan en la industria minera, petróleo y gas. Por último y el área de enfoque de este trabajo de investigación, la línea de asfaltos la cual está encargada de comercializar asfaltos según las necesidades de cada cliente.

Multinsa ubicada en el distrito de Barrancabermeja cerca de la refinería de Ecopetrol, nace en el año 1993 comercializando parafinas y luego de crecer en la industria y darse a conocer en el mercado, comenzaron a comercializar asfalto y en adelante abrirse a las demás líneas de negocio. La presente investigación se realizó en tres momentos: Evaluación del cambio de concentraciones del aditivo y su influencia en agregados pétreos (comportamiento mecánico), análisis de los cambios fisicoquímicos en la interfase entre asfalto y agregados pétreos, y comparación del desempeño del aditivo MPA propuesto por la empresa, con el objetivo de validar la mezcla asfáltica idónea.

La etapa inicial se basa en realizar los ensayos pertinentes para conocer las características que presenta el asfalto base referencia 60-70 en lo que respecta a la energía libre superficial (ángulo de contacto y tensión superficial), proviene de la refinería ECOPETROL S.A (Distrito Especial de Barrancabermeja-Santander). Además de los resultados de laboratorio obtenidos a partir de equipo tensiómetro óptico (software Advance), estas muestras también serán sujetas a caracterización estadística; dicho interrelacionamiento de datos permitirá comprender, el comportamiento del aditivo en concentraciones diferentes a las empleadas a nivel de laboratorio; para lo anterior, se empleó el software Microsoft Excel Professional Plus 2016. Para evaluar la adhesión del asfalto base referencia 60-70, se seleccionaron dos (2) materiales pétreos (base de piedra caliza y base de piedra sílice): Diseño experimental factorial 2X2.

La normativa empleada para la orientación científica experimental de los ensayos relacionados con la energía libre superficial (ángulo de contacto y tensión superficial) ASTM (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales) referencia D7334-08 (versión 2022): Práctica estándar para la humectabilidad superficial de recubrimientos, sustratos y pigmentos

(Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM), 2022). Adicionalmente, para el objetivo específico 1, se tendrá en cuenta los resultados obtenidos por pruebas de penetración (INVIAS 706), viscosidad (INVIAS 716), ablandamiento (INVIAS 712), prueba de agua hervida (registro fotográfico) y prueba de Riedel Webber (INVIAS 774).

Con la parametrización del comportamiento experimental de las mezclas asfálticas en función de las concentraciones de aditivo (comercial y MPA) y de los agregados minerales empleados, se procedió a realizar un análisis elemental cuantitativo por fluorescencia de rayos X (Na-U) con el fin de conocer la composición química (elemento-compuesto) de las mezclas asfálticas usando aditivo Multi-Promotor de Adherencia (MPA) para asfaltos, a través de dos (2) tipos de agregados minerales: Piedra caliza y piedra sílice (equipo espectrómetro); lo anterior corresponde a un referente para comprender la manera en que los agregados minerales influyen hidrodinámicamente, permitiendo validar la mezcla asfáltica adecuada para proyectos viales.

Una vez consolidado el dictamen cuantitativo, se presenta una descripción respecto a la validación positiva o negativa de la mezcla asfáltica con la concentración ideal de aditivo MPA (Multi-Promotor de Adherencia); lo anterior, permitirá a la empresa Multiservicios de Ingeniería S.A. tomar decisiones en materia de producción para el posicionamiento competitivo en el mercado objetivo.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Estudiar el mecanismo fisicoquímico a través del cual el aditivo Multinsa mejora la adherencia entre el asfalto con materiales de origen calizo (material de cantera) y de origen silicio (material de canto rodado).

1.2. Objetivos específicos

Evaluar el efecto del cambio de las concentraciones del aditivo y su influencia en la adhesión entre el asfalto y los materiales pétreos analizados.

Analizar los cambios fisicoquímicos en la interfase entre asfalto-agregado derivados de la adición del promotor Multinsa.

Comparar el desempeño del aditivo Multinsa con un aditivo comercia

3. Marco conceptual

A continuación, se presenta el desarrollo conceptual de algunos términos mencionados como apoyo al ejercicio de la comprensión del fenómeno objeto de estudio. Inicialmente, se considera indispensable tener claridad con relación al proceso de adhesión entre asfalto y agregado, puesto que es considerada como una fuerza de fricción que se evidencia entre la interfaz de dos compuestos o materiales de diferentes propiedades fisicoquímicas, las cuales se caracterizan por manifestar oposición al movimiento relativo (Vasquez et al., 2021), cada uno de los compuestos mencionados anteriormente tienen un comportamiento el cual debe ser comprendido en aras de identificar posibles cambios determinantes en la resolución de la problemática central. El asfalto como mezcla compuesta de mineral a base de destilación petroquímica, característica por fomentar conglomeración y cohesión entre agregados pétreos a través de operaciones unitarias (Guerrero y Pabón, 2020), requiere de condiciones fisicoquímicas ideales para promover el tránsito de vehículos en diferentes condiciones medioambientales (clima).

En ese orden de ideas, las capacidades de conglomeración y adhesión no suelen ser suficientes técnicamente para proyectos viales; por tanto, el asfalto requiere ser aditivado por compuestos químicos o de origen biológico (biomasa) para mejorar propiedades físico-mecánicas (Cañola et al., 2021); por otra parte, en lo que respecta a agregados pétreos, comprende el conjunto de materiales granulares provenientes de la aplicación de operaciones unitarias y/o procesos de meteorización natural, permitiendo ser empleados como ligantes asfálticos (Quintana et al., 2017).

Los principales parámetros determinantes de la calidad entre mezcla asfáltica y adherente son: Ángulo de contacto, energía superficial libre, humectabilidad, superficie de contacto y tensión superficial, las cuales se esclarecen a continuación. El ángulo de contacto se plantea como una tangencia proyectada en la intersección entre la gota del compuesto asfáltico y el sustrato pétreo (superficie que toca a la curvatura de la gota en un punto específico). Así mismo, la energía superficial libre parte de las fuerzas de cohesión moleculares en una superficie (membrana o película) que provoca contracción; lo anterior, se traduce en que la liberación de exceso energético es considerada como energía de superficie (Cely, 2014).

En lo que respecta a la exposición a la humedad ambiental, la humectabilidad es conocida como indicador el cual permite evidenciar la capacidad y calidad del recubrimiento del asfalto sobre el agregado pétreo empleado en la mezcla asfáltica; alto valor de humectabilidad indica alta afinidad del asfalto a recubrir, evidenciando adecuado en trabamiento mecánico (Chaves y Castellanos, 2020). Por otra parte, Angarita (2020) plantea que altos valores de humectabilidad en el asfalto están generalmente vinculados a baja probabilidad de generar superficies susceptibles de penetración del agua en la interfase de la mezcla asfáltica.

A nivel de laboratorio, la superficie de contacto es el área destinada en el ensayo en la cual se posiciona un líquido con el fin de medir y evaluar el ángulo de contacto (Guerrero y Pabón, 2020), lo anterior, relacionado con la tensión superficial, considerada como la fuerza necesaria para separar, romper o quebrantar una película de longitud determinada; la incompatibilidad térmica entre agregado pétreo y ligante genera elevadas tensiones o contracciones térmicas diferenciales: Deterioro localizado en matriz-interfase asfáltica (Figueroa, 2015)

4. Metodología

4.1. Enfoque metodológico

El enfoque metodológico del presente ejercicio académico es tipo cualitativo-cuantitativo. El enfoque cualitativo obedece a la necesidad de determinar la respuesta a nivel de mojabilidad del asfalto referencia 60-70 con diversas concentraciones de aditivos comerciales y MPA (Multi- Promotor de Adherencia) en apoyo con ejercicios de observación directa en laboratorio; siendo este último, propuesto como alternativa innovadora por parte de la empresa Multiservicios de Ingeniería S.A. En ese orden de ideas, el enfoque cuantitativo se plantea en aras de determinar la concentración óptima del aditivo asfáltico MPA para su posterior aplicación en proyectos de infraestructura vial; dichos resultados fueron constatados de conformidad con el comportamiento observacional entre la forma que adquiere la gota de muestreos en una superficie de ensayo con condiciones controladas de laboratorio, en función de la tensión superficial de la muestra y composición química de las muestras asfálticas (aditivo MPA).

4.2. Tipo de investigación

El propósito del presente ejercicio académico es realizar una investigación descriptiva y aplicada que permita identificar el grado de concentración del aditivo MPA (Multi-Promotor de Adherencia) que ofrece una mejor definición de las propiedades físico-mecánicas sobre asfalto referencia 60-70 (proveniente de la refinería de ECOPETROL S.A., ubicada en el Distrito Especial de Barrancabermeja-Santander), luego de la elaboración de diversos ensayos de laboratorio (Centro de Investigación en Catálisis de la Universidad Industrial de Santander) los cuales fueron: Análisis de energía libre superficial (ángulo de contacto y tensión superficial)

y análisis elemental cuantitativo por fluorescencia de rayos X (Na-U) con muestras minerales (piedra caliza y piedra sílice).

La investigación descriptiva según (Guevara et al., 2020), se enfoca en teorizar la manifestación de los fenómenos relacionados con el objeto de estudio, en aras de comprender su naturaleza y así orientar la toma de decisiones. Por otra parte, la investigación aplicada pretende enfocar esfuerzos científicos en identificar posibles soluciones a través de la generación del conocimiento para posteriormente ponerlos en práctica, en el marco del favorecimiento del desarrollo de la sociedad (Maldonado et al., 2023).

4.3. Materiales, equipos y métodos de ensayo de laboratorio

A continuación, se presentan los materiales, equipos y métodos de ensayo empleados para el desarrollo de la investigación (ver Tabla 1):

Tabla 1.

Materiales, equipos y métodos de ensayo de laboratorio.

Análisis de laboratorio	Equipos	Materiales	Métodos de ensayo de laboratorio
Ángulo de contacto	Tensiómetro óptico	Horno de secado, plancha de calentamiento y jeringa plástica de 1 mililitro (volumen)	Software Advance, método Gota Sessile y método Gota Colgante (tensión superficial)
Tensión superficial			Análisis elemental cuantitativo por fluorescencia de rayos X (Na-U) con muestras minerales (FRX-02)
Caracterización fisicoquímica de muestras asfálticas		Espectrómetro	

4.4.Procedimiento

4.4.1. Fase metodológica 1

La etapa inicial se basa en realizar los ensayos pertinentes para conocer las características que presenta el asfalto base referencia 60-70 en lo que respecta a la energía libre superficial (ángulo de contacto y tensión superficial), proviene de la refinería ECOPETROL S.A (Distrito Especial de Barrancabermeja-Santander). Además de los resultados de laboratorio obtenidos a partir de equipo tensiómetro óptico (software Advance), estas muestras también serán sujetas a caracterización estadística. Para evaluar la adhesión del asfalto base referencia 60-70, se seleccionaron dos (2) materiales pétreos (base de piedra caliza y base de piedra sílice): Diseño experimental factorial 2X2 (ver Tabla 2):

Tabla 2.

Condiciones experimentales del ensayo de laboratorio: diseño factorial 2X2.

	Condiciones experimentales (concentraciones porcentuales)	B1: Concentraciones Aditivo comercial (0,03%, 0,05% y 0,07%)	B2: Concentraciones Aditivo MPA (0,03%, 0,05% y 0,07%)
A1	Asfalto base referencia 60- A1 70 + agregado calizo	A1B1	A1B2
A2	Asfalto base referencia 60- A2 70 + agregado sílice	A2B1	A2B2

La normativa empleada para la orientación científica experimental de los ensayos relacionados con la energía libre superficial (ángulo de contacto y tensión superficial) es ASTM (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales) referencia D7334-08 (versión 2022): Práctica estándar para la humectabilidad superficial de recubrimientos, sustratos y pigmentos (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM), 2022).

Adicionalmente, para el objetivo específico 1, se consideraron los resultados obtenidos por pruebas de penetración (INVIAS 706), viscosidad (INVIAS 716), ablandamiento (INVIAS 712), prueba de agua hervida (registro fotográfico) y prueba de Riedel Webber (INVIAS 774).

4.4.2. Fase metodológica 2

Con la parametrización del comportamiento experimental de las mezclas asfálticas en función de las concentraciones de aditivo (comercial y MPA) y de los agregados minerales empleados, se procedió a realizar un análisis elemental cuantitativo por fluorescencia de rayos X (Na-U) en aras de conocer la composición química (elemento-compuesto) de las mezclas asfálticas usando aditivo Multi-Promotor de Adherencia (MPA) para asfaltos, a través de dos (2) tipos de agregados minerales: Piedra caliza y piedra sílice (equipo espectrómetro); lo anterior, servirá como referente para comprender la manera en que los agregados minerales influyen hidrodinámicamente, permitiendo validar la mezcla asfáltica adecuada para proyectos viales.

4.4.3. Fase metodológica 3

Una vez consolidado el dictamen cuantitativo (fase metodológica 1) y dictamen cualitativo (fase metodológica 2), se realizará una descripción respecto a la validación positiva o negativa de la mezcla asfáltica con la concentración ideal de aditivo MPA (Multi-Promotor de Adherencia); lo anterior, permitirá a la empresa Multiservicios de Ingeniería S.A. tomar decisiones en materia de producción para el posicionamiento competitivo en el mercado objetivo.

5. Resultados

5.1. Evaluación del efecto de concentraciones de aditivos objeto de estudio

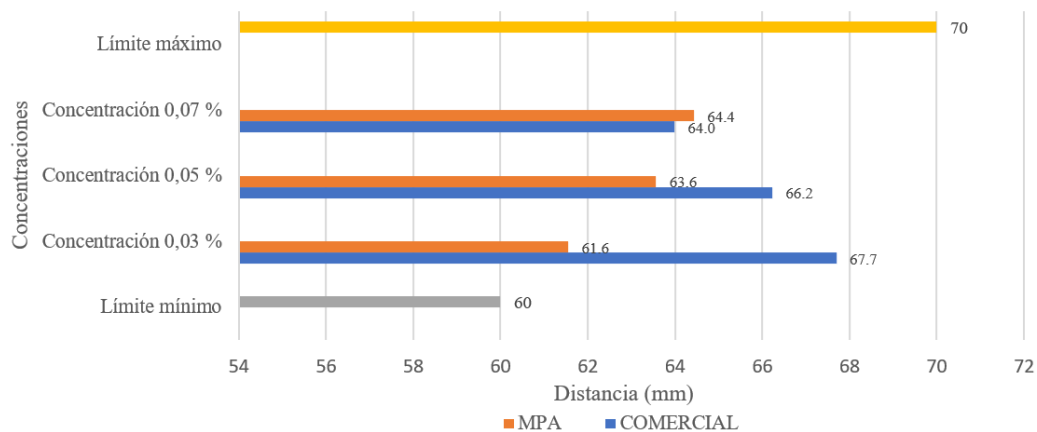
En primer lugar, se procede a continuación, exponer los hallazgos correspondientes con los efectos percibidos a nivel de laboratorio, en lo que concierne como los cambios del aditivo y su incidencia en la calidad de adhesión entre asfalto y materiales pétreos analizados.

5.1.1. Prueba de penetración (INVIAS 706)

De acuerdo con los lineamientos metodológicos de INVIAS 706, dicha prueba se basa en la necesidad de comprender el comportamiento consistente de los materiales que componen la mezcla asfáltica; lo anterior, se traduce como la distancia hasta la cual una aguja en condiciones de normalización penetra de forma vertical el material en condiciones de carga definidas, en asociación con temperatura (25°C) y tiempo (5 segundos). Los resultados obtenidos por cada adherente, según concentraciones objeto de estudio son las siguientes (ver Figura 1).

Figura 1.

Análisis comparativo: Prueba de penetración (INVIAS 706)



De conformidad con la figura anterior, ambos aditivos de adherencia están dentro de los límites mínimos y máximos permisibles, establecidos por la norma INVIAS 706; no

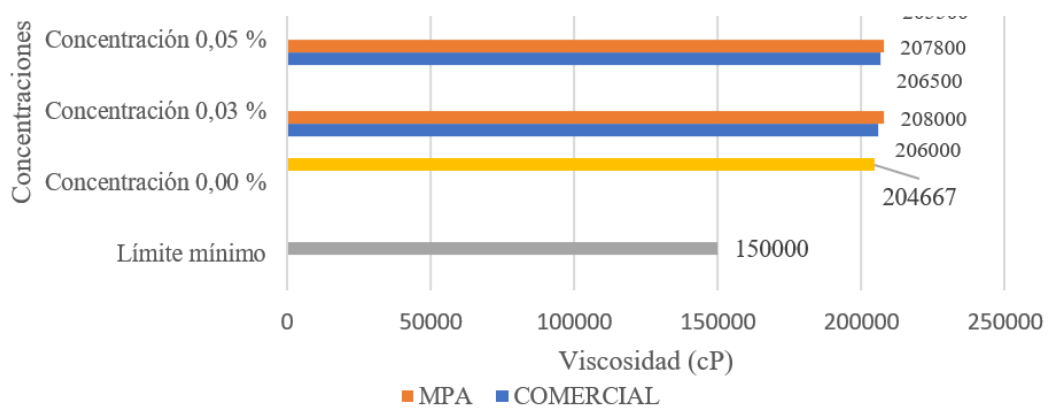
obstante, el comportamiento de cada uno conforme varía la concentración es diferenciador puesto que es menor el índice de penetración lo cual está asociado con la estabilidad asfáltica (Ruiz y Suárez, 2022). Para el caso del aditivo comercial, el incremento de la concentración es inversamente proporcional a la distancia de interfase de la mezcla asfáltica, lo que se traduce en que, a menores concentraciones de aditivo comercial, mayor estabilidad asfáltica (reducción de costos operativos). Por otra parte, el incremento de la concentración del aditivo MPA es directamente proporcional a la distancia de interfase de la mezcla asfáltica, lo que se traduce en que a mayores concentraciones de aditivo MPA, menor estabilidad asfáltica (incremento de costos operativos).

5.1.2. Prueba de viscosidad (INVIAS 717)

De acuerdo con los lineamientos de norma INVIAS 717, el límite mínimo permisible es de 150.000 centi-poise (cP); de conformidad con la Figura 2, ambos aditivos se encuentran por encima del valor de referencia mencionado anteriormente, lo cual es favorable para ambos casos.

Figura 2.

Análisis comparativo: Prueba de viscosidad (INVIAS 717).



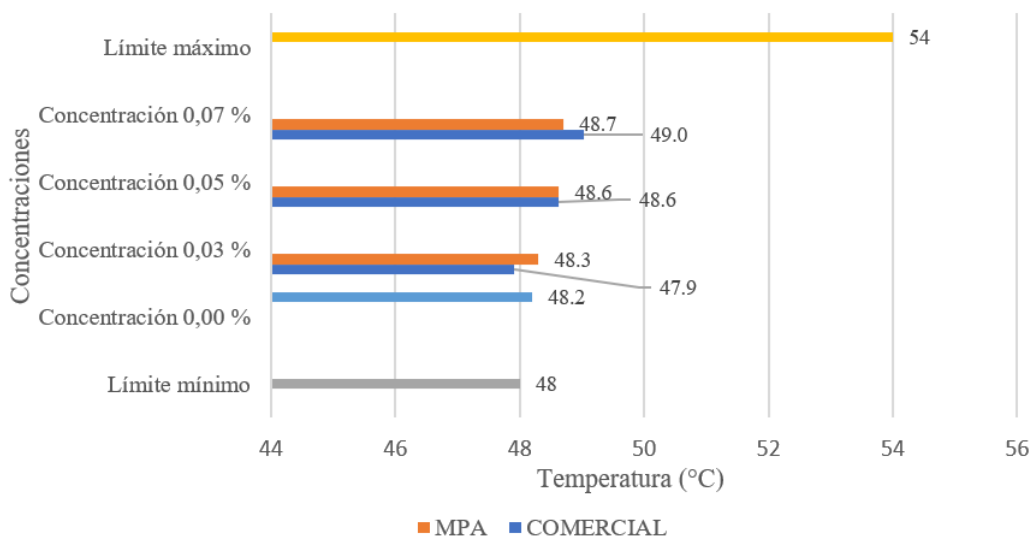
Sin embargo, comparando las tendencias se logra evidenciar un mejor comportamiento del asfalto (mayor viscosidad), lo cual, aunque no es representativo, podría traducirse en mejores comportamientos del asfalto en proyectos viales.

5.1.2. Prueba de ablandamiento (INVIAS 712)

Teniendo presente los lineamientos de la norma INVIAS 717, los límites mínimos y máximos de ablandamiento para mezclas asfálticas es entre 48 y 54 grados centígrados, respectivamente (ver Figura 3). De acuerdo con la figura anterior, en ambos aditivos con concentración 0,05% tienden a presentar comportamiento termodinámico similar; sin embargo, la concentración ideal del aditivo MPA es 0,03% puesto que es la que evidencia mejores condiciones de ablandamiento, mientras que, a dicha concentración, el aditivo comercial está por debajo del límite mínimo permisible, lo cual resulta ser inviable para proyectos viales.

Figura 3.

Análisis comparativo: Prueba de ablandamiento (INVIAS 712).



5.1.4. Prueba de Riedel Weber (INVIAS 774)

La norma INVIAS 774 describe el procedimiento para la realización de la prueba Riedel Weber, la cual, aunque las condiciones de laboratorio (variables controladas) no son similares a las condiciones en campo (proyectos viales), los resultados suelen ser eficaces en cuanto a la capacidad de definir una adecuada adhesividad, lo que se interpreta en términos de viabilidad y factibilidad como margen de seguridad suficiente para el uso de agregado objeto de estudio. De acuerdo con los resultados obtenidos, la concentración ideal para aditivo comercial es 0,07% permitiendo obtener un índice de adhesividad máximo de 6 (ver Tabla 3.); la concentración ideal para aditivo MPA es 0,07% permitiendo obtener índice de adhesividad máximo de 8, evidenciando el aditivo MPA como aquel con mejores características objeto de estudio (Tabla 3).

Tabla 3.

Prueba de Riedel Weber: Aditivo MPA a 0,07%.

Concentración: MPA 0,07%		
Solución de ensayo	Resultado	Índice de adhesividad
Desplazamiento total del agua destilada	P	0
M/256	P	1
M/128	P	2
M/64	P	3
M/32	P	4
M/16	P	5
M/8	P	6
M/4	P	7
M/2	T	8
M/1	T	8

Tabla 4.*Prueba de Riedel Weber: Comercial a 0,07%.*

Concentración: MPA 0,07%		
Solución de ensayo	Resultado	Índice de adhesividad
Solución de ensayo	Resultado	Índice de adhesividad
Desplazamiento total del agua destilada	P	0
M/256	T	1
M/128	T	2
M/64	T	3
M/32	T	4
M/16	T	5
M/8	P	6
M/4	P	6
M/2	P	6

5.1.5. Prueba de agua hervida

Teniendo en cuenta los lineamientos de la norma INVIAS 757, se elaboró la prueba de agua hervida, el cual tuvo como propósito, a través de observación directa, comprender el efecto del agua hirviendo sobre mezclas asfálticas sueltas (10 minutos de duración), con el objeto de reconocer si visualmente se evidencia o no adherencia en agregados pétreos cubiertos con asfalto. De acuerdo con las experimentaciones, se demostró que a mayor concentración de aditivo (comercial o MPA) mayor es la cantidad apreciada visualmente de asfalto adherido al agregado pétreo, siendo ligeramente superior en aditivo MPA a concentración 0,07% de aditivo con agregado de río.

5.1. Cambios fisicoquímicos en interfase asfalto-agregado (aditivo Multinsa)

En el siguiente apartado, se presentará la descripción de los cambios fisicoquímicos obtenidos a nivel de laboratorio, en el marco de la experimentación de la interfase asfalto-agregados pétreos objeto de estudio, teniendo como referente el aditivo promotor de adherencia

de Multinsa.

La determinación de la energía libre superficial fue el laboratorio inicial por el cual se analizó las capacidades de adhesión del asfalto referencia 60/70 con los diversos agregados (piedra caliza y piedra sílice) y aditivos objeto de estudio; lo anterior, compuesto por dos (2) ensayos: ángulo de contacto y tensión superficial. Se realizaron siete (7) muestreos puntuales de asfaltos referencia 60/70; las mediciones de ángulo de contacto se elaboraron para cada grava, puesto que cada una de estas fueron cortada en ocho (8) secciones más pequeñas para facilitar los ensayos de laboratorio.

Los asfaltos muestreados fueron calentados en un horno de secado a una temperatura de 110 °C durante toda la noche; la temperatura se mantuvo al realizar la medición con la asistencia de una plancha de calentamiento, en aras de que los asfaltos muestreados fluyeran en una jeringa plástica de un (1) milímetro de capacidad. La medición tanto de ángulo de contacto como de tensión superficial se realizaron mediante equipo tensiómetro óptico referencia DSA25E; los datos derivados fueron procesados mediante software Advance (**Apéndices A**). Para el caso del ángulo de contacto, según la disponibilidad de fluidización del goteo de las muestras, se realizaron entre dos (2) a tres (3) análisis por fluido (en ambas gravas) tanto para ángulo izquierdo como para ángulo derecho, permitiendo generar un ángulo promedio general, el cual fue objeto de estudio durante el proceso de evaluación del ángulo de contacto, teniendo en cuenta los lineamientos de ASTM D7334-08: Práctica estándar para la humectabilidad superficial de recubrimientos, sustratos y pigmentos (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM), 2022).

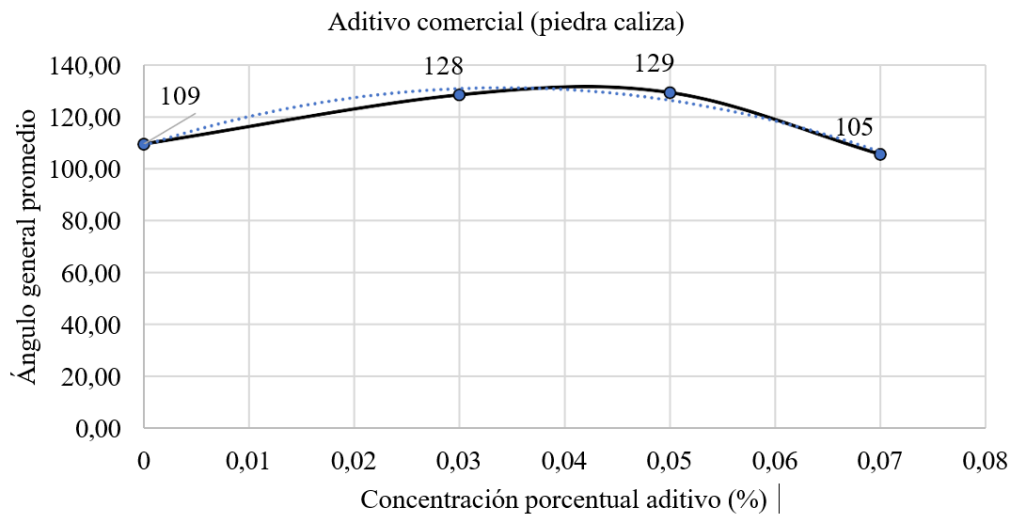
5.3. Medición y evaluación del ángulo de contacto

5.3.1. Ángulo de contacto para aditivo comercial

Los resultados mencionados anteriormente fueron procesados mediante la herramienta gráfica de dispersión (Microsoft Excel Professional Plus 2016), con el propósito de comprender la forma en que varía la capacidad humectante del aditivo comercial, en función de los agregados minerales empleados de forma experimental.

Figura 4.

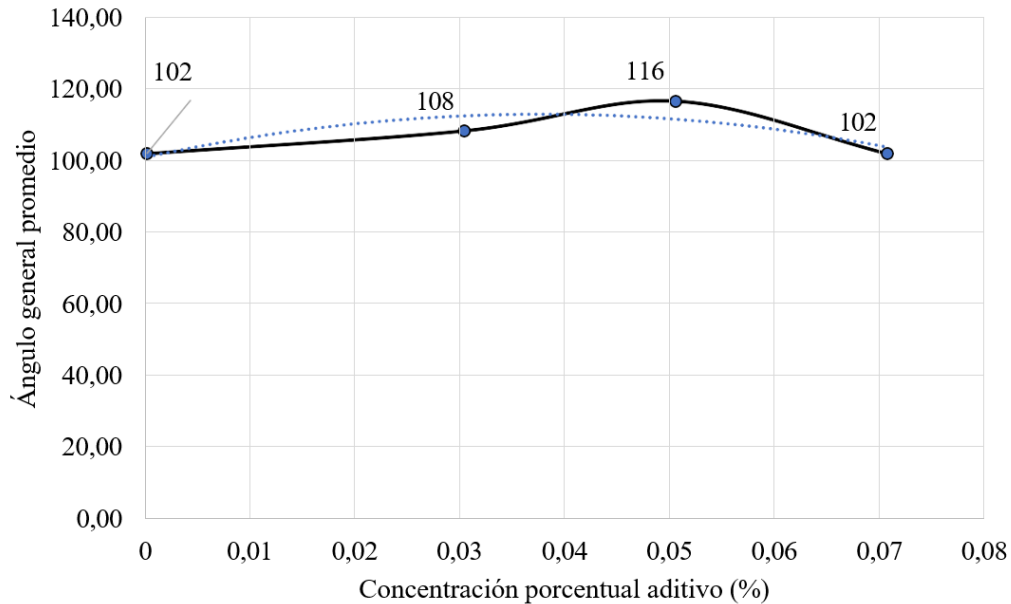
Dinámica adhesiva de asfalto con aditivo comercial: Piedra caliza



De acuerdo con la norma ASTM D7334-08 (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM), 2022), las mezclas asfálticas con grados inferiores a 45° son alta mojabilidad, el grado de humectación intermedia se alcanza entre 46° y 90° , mientras que la condición de baja mojabilidad se identifica cuando el ángulo de goteo es superior a 90° (deseable). Al comparar los valores de referencia mencionados anteriormente con los resultados de la Figura 4, se identificó que la concentración de aditivo comercial para asfalto referencia 60/70 (piedra caliza) es de 0,05% (ángulo de contacto: $129,27^\circ$), mientras que la condición más mojabla se evidenció en la concentración de aditivo comercial 0,07% (ángulo de contacto: $105,76^\circ$).

Figura 5.

Dinámica adhesiva de asfalto con aditivo comercial: Piedra sílice.



Al comparar los valores de referencia mencionados anteriormente con los resultados de dicha figura, se identificó que la concentración de aditivo comercial para asfalto referencia 60/70 (piedra sílice) es de 0,05% (ángulo de contacto: 116°), mientras que la condición más mojable se evidenció en la concentración de aditivo comercial 0,07% (ángulo de contacto: 102°).

Para el caso del uso de aditivo comercial, tanto para piedra caliza (ver Figuras 4 y 5) como para piedra sílice, se evidenció que tienen el mismo comportamiento adhesivo al incrementar o disminuir las concentraciones de aditivo comercial, diferentes a las empleadas en los ensayos de laboratorio; no obstante, la condición adhesiva más mojable la obtuvo el aditivo comercial con piedra caliza a una concentración de 0,1% (24,75°), mientras que la condición adhesiva más hidrófoba (favorable) la obtuvo el aditivo comercial con piedra caliza a una concentración no simulada (laboratorio) de 0,5% (129,27°). Dicha información

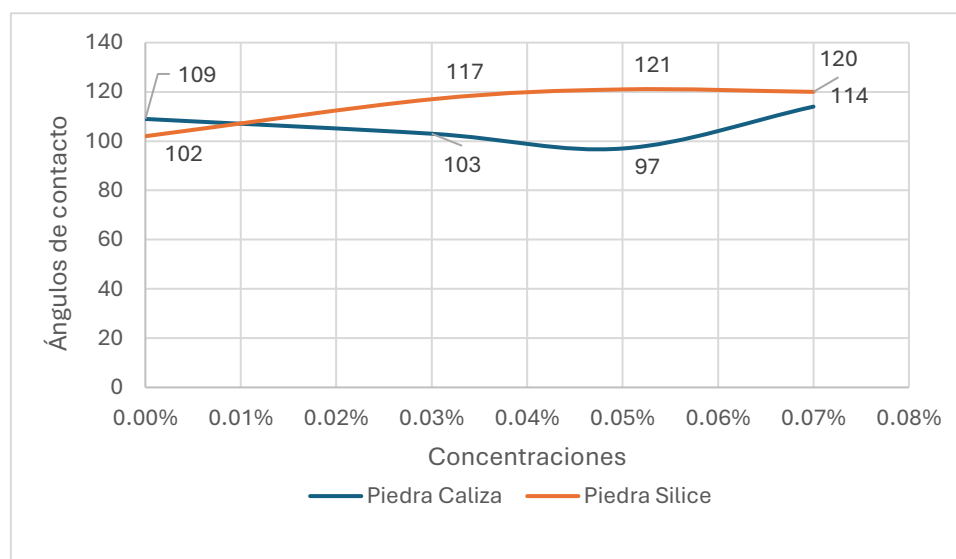
presentada anteriormente, constituye un soporte para la empresa Multiservicios de Ingeniería S.A. la toma de decisiones para la factibilidad y/o viabilidad de proyectos de infraestructura vial.

5.3.2. Ángulo de contacto para aditivo MPA

A continuación, se presenta los resultados del ángulo de contacto para el aditivo MPA, empleando piedra caliza y piedra sílice (Ver Figura 6) (método de ensayo Gota Colgante):

Figura 6.

Laboratorio de ángulo de contacto para aditivo MPA.



Los resultados mencionados anteriormente fueron procesados mediante la herramienta gráfica de dispersión (Microsoft Excel Professional Plus 2016). Cabe mencionar que, con el aditivo MPA funcionan de una mejor manera a 0.03 usando piedra caliza y 0.05 con piedra sílice. Finalmente, es una forma de comprender la variación y la capacidad humectante del aditivo MPA, en función de los agregados minerales empleados de forma experimental.

5.3.3. *Análisis de tensión superficial*

Para el análisis de la tensión superficial entre asfalto referencia 60/70 y aditivos objeto de estudio, se utilizó al igual que para los ensayos de ángulo de contacto, el equipo tensiómetro óptico DSA25E utilizando como apoyo el software Advance; por otra parte, el procedimiento para lo anterior fue direccionado a través del método de ensayo Gota Colgante.

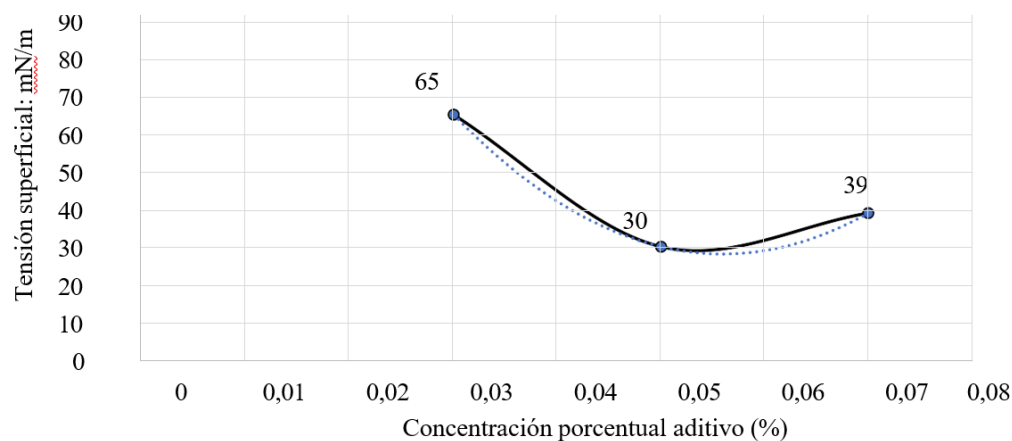
La tensión superficial es una propiedad físico-mecánica de los asfaltos, la cual ayuda a comprender la forma de cohesión entre partículas de un conglomerado objeto de estudio; según (Sierra, 2021), a mayor tensión superficial (energía por unidad de área), mayor resistencia tendrá la mezcla asfáltica en proyectos de infraestructura.

5.3.4. *Dinámica de la tensión superficial con aditivo comercial*

Teniendo en cuenta los resultados de laboratorio para tensión superficial, la concentración de aditivo comercial que logró condiciones de adhesión más favorables fue 0,07% (35,65 mN/m), mientras que la concentración (aditivo comercial) con menor tensión superficial fue 0,03% (27,84 mN/m) (**Apéndices A**).

5.3.5. *Dinámica de la tensión superficial con aditivo MPA*

De acuerdo con el objeto de estudio del presente apartado, a menor tensión superficial, mayor será la tendencia a formar estructuras granulares con relaciones área/volumen reducidas, permitiendo obtener óptimas adhesiones (Ovalles & Rodríguez, 2019). Teniendo en cuenta los resultados de laboratorio para tensión superficial, la concentración de aditivo MPA que logró condiciones de adhesión más favorables es 0,03% (65,49 mN/m), mientras que la concentración con menor tensión superficial fue 0,07% (39,36 mN/m), disponible en Figura 6 (**Apéndices A**).

Figura 7.*Dinámica de la tensión superficial con aditivo MPA.*

5.4. Desviación Estándar

De acuerdo con la desviación estándar se puede contemplar que en la penetración y el ablandamiento no existe una desviación estándar muy relevante con respecto a los tres datos tomados para cada concentración. Sin embargo, la viscosidad si posee una desviación estándar significativa para el aditivo comercial, mientras que para el MPA no se presentó ningún tipo de desviación estándar.

Tabla 5.*Desviación estandar a distintas concentraciones*

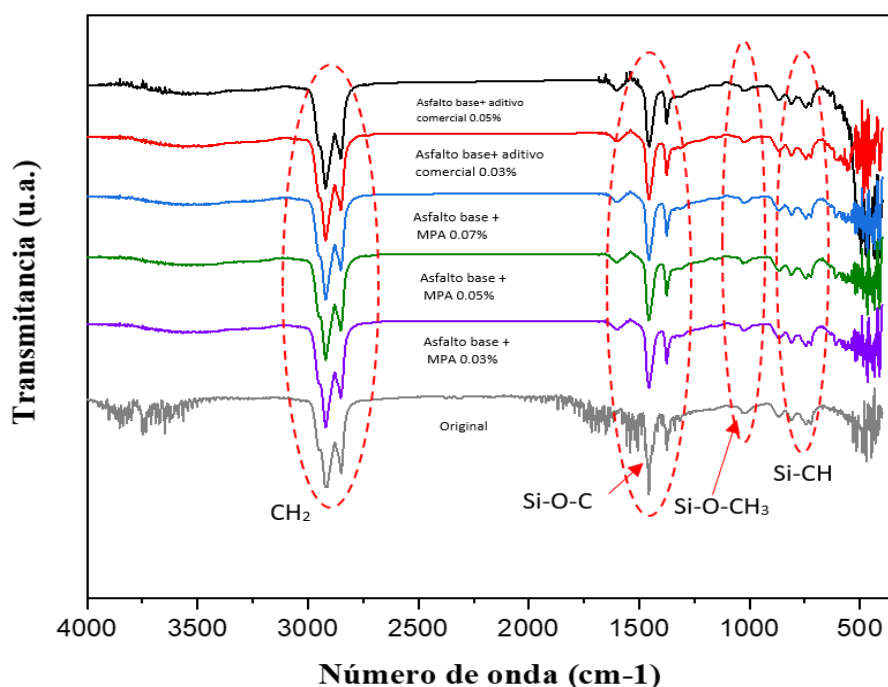
Muestra	Concentración	Penetración	Ablandamiento	Viscosidad
Base	0.00%	1.32287566	0.173205081	3214.55025
	0.03%	1.61562166	0.404145188	3000
	0.05%	0.23643181	0.2081666	2500
	0.07%	0.5064912	0.37859389	500
COMERCIAL	0.03%	0.12858201	0.3	0
	0.05%	1.05987421	0.251661148	0
	0.07%	0.23094011	0.3	0

5.5. Espectroscopía Infrarroja

De acuerdo con los FTIR realizados se observó la presencia del Silano- Carbón (Si-CH) entre los $773\text{-}816\text{ cm}^{-1}$, también una adsorción de picos del grupo Metoxi sobre los $1092\text{ y }1192\text{ cm}^{-1}$, indicando la presencia de estas estructuras en la matriz del asfalto modificado. Además, alrededor de los 1500 cm^{-1} , lo cual es posible que haya ocurrido una reacción entre el silano y los componentes del asfalto. De igual forma, se evidenció la presencia del grupo funcional Si-O-C, finalmente, sobre los $2850\text{-}2900\text{ cm}^{-1}$, como se presenta en literatura son rangos que corresponden al grupo funcional metileno (CH_2) (Ahmed et al., 2009). De manera general, se observó la presencia de estos grupos en todas las muestras a distintas concentraciones, evidenciando que hubo una buena interacción entre el aditivo y el asfalto, en el mismo orden ideas, se presentó en la muestra original diversas señales de ruido, algo muy común en muestras que no son tratadas previamente y se usan como referencia para los picos de las muestras trabajadas a nivel laboratorio.

Figura 8.

Espectroscopía infrarroja



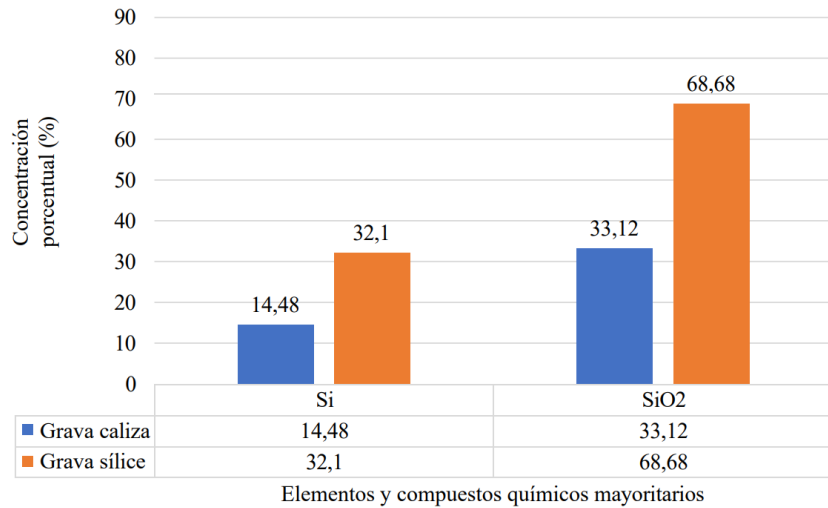
5.6. Comparativo de desempeño de aditivo Multinsa vs aditivo comercial

A continuación, se presenta un análisis comparativo del desempeño de adherencia evidenciado por aditivo Multinsa, en comparación con los resultados derivados del aditivo comercial, en aras de demostrar el grado de efectividad en función del tipo de agregado pétreo empleado. De acuerdo con Orozco (2019), los aditivos promotores de adhesión en asfaltos están precisamente fabricados para incrementar la afinidad con los materiales pétreos a medida que se incrementa las concentraciones; sin embargo, aunque la adhesión del aditivo MPA se duplica aproximadamente al pasar de 0,05% a 0,03% (ver Figura 9), es un comportamiento anormal dentro de los estándares establecidos por ASTM referencia D7334-08 (versión 2022) (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM), 2022).

No obstante, si se comparan las concentraciones máximas de ambos aditivos, el aditivo comercial suele ofrecer 9,42% adhesión de la mezcla asfáltica; sin embargo, en cuanto a humectación se refiere, el asfalto (piedra sílice) con aditivo MPA (0,07%) es 14,81% más resistente a la humedad, en comparación con el asfalto aditivo comercial (0,05%) empleando piedra caliza (ver Figura 9). A continuación, se presenta el comparativo de elementos y compuestos químicos de referencia para el análisis presentado anteriormente:

Figura 9.

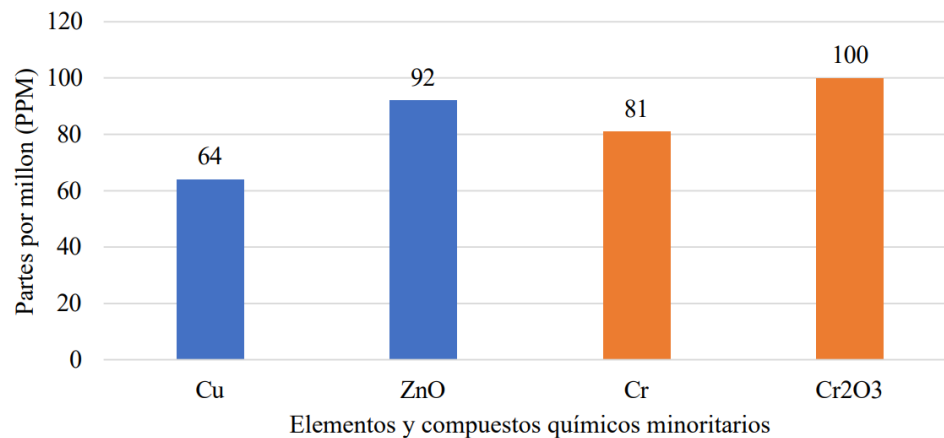
Comparativo de composición de elementos y compuestos químicos mayoritarios.



Revisando las composiciones porcentuales de elementos y compuestos químicos de los agregados minerales objeto de estudio (ver **Apéndices B**), se logra reconocer que la presencia de silicio y óxido de silicio son fundamentales e incidentes en la variabilidad de la tensión superficial (adhesión) y ángulo de contacto (resistencia a la humectación); sin embargo, las composiciones porcentuales de la piedra caliza resultaron ser más convenientes para obtener mejor calidad de mezclas asfálticas mediante la asistencia química del aditivo MPA (ver Figura 10).

Figura 10.

Comparativo de composición de elementos y compuestos químicos minoritarios.



Complementario a lo anterior, se identificaron concentraciones minoritarias de ciertos elementos y compuestos químicos en los agregados pétreos (color azul-grava caliza y color naranja-grava silicio). Al realizar una revisión de la literatura bibliográfica, se evidenció que los compuestos químicos presentes en el asfalto en forma mineral como ZnO (óxido de zinc) de acuerdo con Sharma et al., (2022) ofrecen propiedades adhesivas y repelentes de humedad como revestimiento (piedra caliza). En cambio, el óxido crómico (Cr₂O₃) ofrece pigmentación para conglomerantes minerales como la grava silicio en asfaltos (Caballero, 2021). Por tanto, la grava caliza ofrece mejores propiedades como aglomerado.

6. Conclusiones

Teniendo en cuenta la evaluación del cambio de las concentraciones de los aditivos, se logró validar el aditivo MPA desde los resultados obtenidos en las pruebas de viscosidad, ablandamiento y prueba Riedel Weber; dicho aditivo evidenció tendencia a perder resistencia a mayores concentraciones, sin superar el límite mínimo máximo permisible; en otras palabras el aditivo comercial demostró mayor resistencia al ensayo de laboratorio (estabilidad mecánica) sin superar el límite máximo permisible de la norma INVIAS 706. El índice de adhesividad más alto lo obtuvo el aditivo MPA con valor de 8, superior al obtenido por aditivo comercial (índice de adhesividad: 6).

En cuanto a los cambios fisicoquímicos en interfase asfalto- agregado, se logró establecer que la concentración de aditivo comercial para asfalto 60/70, empleando como agregado la piedra caliza y sílice es de 0,07% (ángulo de contacto 105°) y (102°) respectivamente; lo anterior, se traduce en que el aditivo comercial tiene mayor comportamiento adhesivo con la piedra sílice en comparación con el agregado calizo. En lo que respecta al aditivo MPA, la concentración ideal fue 0,05% (ángulo de contacto: 97°), dado que estos ángulos son más pequeños, para la piedra caliza como agregado, mientras que para piedra sílice, la adhesión fue mayor a 0,03% (117°); por tanto, se traduce en que el aditivo MPA tiene mejor comportamiento adherente en piedra caliza.

Al analizar las composiciones porcentuales de elementos y compuestos químicos de agregados minerales (ver **Apéndices B**), se reconoce que la presencia de silicio y óxido de silicio son incidentes en la variabilidad de la tensión superficial (adhesión) y ángulo de contacto (resistencia a la humectación); existen elementos y compuestos químicos diferenciadores que podrían marcar la diferencia, puesto que compuestos como óxido de zinc

(piedra caliza) ofrece propiedades adhesivas y repelentes a la humedad, mientras que el óxido crómico ofrece a la mezcla asfáltica una pigmentación nítida, optimizando la presentación del pavimento (la grava caliza tiene mejores propiedades adhesivas y menor mojabilidad).

6. Recomendaciones

Se recomienda a la empresa Multiservicios de Ingeniería S.A. (MULTINSA 1A) a realizar nuevos ensayos de laboratorio concerniente con los parámetros físico-mecánicos de energía libre superficial (ángulo de contacto y tensión superficial) para verificar nuevos comportamientos en materia de adhesión para el aditivo MPA con concentraciones de 0,08%, 0,09% y 0,1%, tanto con agregado mineral a base de caliza y silicio; así mismo, se recomienda replicar lo anterior para concentraciones de aditivo MPA (0,03%, 0,02% y 0,01%).

Se recomienda a la comunidad científica a que ejercicios académicos de similar naturaleza tengan en cuenta la incidencia química de los elementos y compuestos químicos de los agregados minerales y/o alternativo objeto de investigación, en aras de identificar valor agregado a las mezclas asfálticas en materia de pigmentación y/o adhesión complementaria.

Se recomienda a empresas contratistas de proyectos dedicados a infraestructura vial tener en cuenta la composición porcentual de silicio y dióxido de silicio (sílice), puesto que el análisis elemental cualitativo por fluorescencia de rayos X (Na-U) demostró que, a menor concentración mineral, mayor resistencia a la humectación tendrá las mezclas asfálticas con el aditivo MPA; por tanto, las gravas calizas son recomendados para la estructuración de la interfase de mezclas asfálticas.

Referencias Bibliográficas

Ahmed, G. S., Gilbert, M., Mainprize, S., & Rogerson, M. (2009). FTIR analysis of silane grafted high density polyethylene. *Plastics, Rubber and Composites*, 38(1), 13-20.

<https://doi.org/10.1179/174328909X387711>

Angarita Rojas, J. C. (2020). *Susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas finas con adición de tereftalato de polietileno (pet)*. <http://hdl.handle.net/1992/48560>

CABALLERO, A. C. (2021). “EFECTO DEL PIGMENTO INORGÁNICO EN LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS Y MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE, LIMA 2019” [PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL]. Universidad Nacional del Centro de Perú huancayo.

Cañola, H., Granda-Ramírez, F., & Arroyave-Rojas, J. (2021). Emulsión asfáltica como alternativa de reducción de la presencia de eflorescencias en morteros de pega. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), Article 1. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021009>

Cely Leal, N. E. (2014). *Estudio de la adhesión y cohesión de tres tipos de agregados pétreos utilizados en Bogotá-Colombia con asfalto 60-70*.

<https://doi.org/10.11144/Javeriana.10554.15524>

Figueroa Infante, A. S. (2015). *Investigación sobre el efecto del agua en el asfalto y su impacto en la mezcla asfáltica*. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.10554.33624>

Guerrero, W. M. C., & Pabón, S. B. C. (2020). Efecto del envejecimiento de mezclas asfálticas en el ciclo de vida del pavimento desde el aspecto técnico y ambiental. Revisión del estado de conocimiento. *Revista Vínculos*, 17(1), Article 1.

<https://doi.org/10.14483/2322939X.16227>

- Guevara Albán, G. P., Verdesoto Arguello, A., & Castro Molina, N. E. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *RECIMUNDO: Revista Científica de la Investigación y el Conocimiento*, 4(3), 163-173.
- Maldonado, J. J. C., Macho, L. K. G., & Casallas, E. C. (2023). La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI. *Tecnura*, 27(75), Article 75. <https://doi.org/10.14483/22487638.19171>
- Orozco Tinoco, M. A. (2019). *Efecto de promotores de adherencia en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas en caliente*.
<https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/10128>
- Quintana, H. A. R., Vergara, O. I. L., & Gómez, W. D. F. (2017). Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia fabricada en una planta de asfalto. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(1), Article 1.
- Ruiz Duarte, J. C., & Suárez Mejía, A. M. (2022). *Estudio del efecto de sales hidrotropicas sobre el comportamiento reológico de surfactantes aniónicos usados en recobro mejorado de petróleo*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/9828>
- Sharma, D. K., Shukla, S., Sharma, K. K., & Kumar, V. (2022). A review on ZnO: Fundamental properties and applications. *Materials Today: Proceedings*, 49, 3028-3035.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.238>
- Vasquez Llamo, R. E., Vasquez Ramírez, W. R., & Muñoz Pérez, S. P. (2021). Uso de aditivos adherentes en el diseño de mezclas asfálticas en caliente: Una revisión. *Gaceta Técnica*, 22(1), 66-78.

Apéndices

Apéndices A. Laboratorio de energía libre superficial: ángulo de contacto - tensión superficial.

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER INFORME DE RESULTADOS	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 1 de 24

1. DATOS GENERALES

ENTIDAD SOLICITANTE: Multiservicios de Ingeniería S.A.

MUESTRAS RECIBIDAS: 2 gravas y 7 asfaltos

DESCRIPCIÓN DE LA(S) MUESTRAS: 2 bolsas de grava diversos tamaños y 7 frascos con muestras de asfalto

FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: Agosto de 2022

ANÁLISIS SOLICITADO: Energía libre superficial: Angulo de Contacto-Tensión superficial

FECHA DE REALIZACIÓN DEL ANÁLISIS: 01/03/2023

2. DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS

Se realizaron mediciones de ángulo de contacto para cada grava; para esto cada grava fue cortada en 8 secciones más pequeñas para poder llevarlas a un tamaño que permitiera la medición, además para obtener una sección de grava para cada uno de los 7 asfaltos a analizar y una sección de grava para la medición con agua. Los asfaltos fueron calentados en un horno de secado a 110 °C durante toda la noche, la temperatura se mantuvo al realizar la medición con la ayuda de una plancha de calentamiento, esto se realizó con el objetivo de que el asfalto fluyera en una jeringa plástica de 1 ml de volumen, utilizada para generar la gota sobre cada grava.

Las mediciones de tensión interfacial se realizaron con las mismas condiciones de temperatura para cada asfalto en jeringas de plástico de 1 ml. Para cada asfalto se realizaron tres mediciones y tres mediciones con agua.

Ambas mediciones se realizaron en un tensiómetro óptico DSA25E, utilizando el software Advance.

3. RESULTADOS

Las mediciones de ángulo de contacto se realizaron por el método de Gota Sessile y para tensión interfacial se usó el método de Gota Colgante, en el cual se utilizaron dos medios; asfalto-aire y agua-aire. La **Tabla 1** presenta los resultados del análisis de ángulo de contacto de 7 asfaltos en 2 gravas como soporte para la medición.

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS
 LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.

Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485

e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
	INFORME DE RESULTADOS	

Tabla 1. Resumen de resultados obtenidos para 7 asfaltos y 2 gravas.

Fluido	Grava	Gota	Ángulo Izquierdo [°]	Ángulo Derecho [°]	Ángulo Promedio [°]	Ángulo Promedio General	Desviación			
Agua destilada	1	1	37.88	36.35	37.12	37.46	0.49			
		2	38.46	37.60	38.03					
		3	34.28	40.20	37.24					
	2	1	68.16	71.84	70.00	79.74	8.48			
		2	82.96	88.09	85.52					
		3	81.11	86.32	83.72					
Asfalto Base	1	1	121.81	112.71	117.26	117.52	0.36			
			122.47	113.08	117.77					
		2	104.88	99.13	102.01					
			104.59	98.69	101.64					
		2	1	89.16	85.67			87.41	87.57	0.30
				89.50	86.35			87.92		
	89.39			85.38	87.39					
	2		122.30	110.70	116.50					
			122.24	110.66	116.45					
			123.17	112.18	117.67					
	Asfalto Base + Comercial 0.03%	1	1	121.22	118.98	120.10	120.40	0.45		
				121.97	119.85	120.91				
121.22				119.14	120.18					
2			136.90	135.65	136.28					
			137.46	136.17	136.81					
			136.66	135.38	136.02					
2		1	87.88	84.29	86.08	86.67	0.54			
			86.85	87.47	87.16					
			87.70	85.82	86.76					
		2	119.99	140.56	130.27					
			120.75	141.44	131.10					
			119.24	140.26	129.75					
1	1	132.17	130.29	131.23	131.10	0.82				
		132.80	130.92	131.86						
		131.63	128.82	130.23						

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS
 LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.

Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485

e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Código: IRF-I
			Versión: 3
	INFORME DE RESULTADOS		Página 3 de 24

Asfalto Base + Comercial 0.05%	2	2	128.60 127.89 127.76	127.27 126.62 126.44	127.94 127.25 127.10	127.43	0.45		
		1	1	92.70 94.02 93.08	99.74 100.59 99.64	96.22 97.31 96.36	96.63	0.59	
			2	138.58 138.93 138.32	134.95 135.43 134.54	136.76 137.18 136.43	136.79	0.38	
	Asfalto Base + Comercial 0.07%	1	1	94.84 95.10 95.62	87.20 87.40 87.21	91.02 91.25 91.41	91.23	0.20	
			2	1	130.28 129.94 130.24	110.78 110.05 110.30	120.58 119.99 120.27	120.28	0.29
				2	101.73 101.99 102.88	105.85 106.14 106.96	103.92 104.06 104.92	104.30	0.54
2		1	96.78 96.07 96.43	105.42 104.95 101.45	101.10 100.51 98.94	100.18	1.12		
		1	1	105.27 105.23	100.35 100.25	102.81 102.74	102.77	0.05	
			2	100.41 100.62	109.56 109.54	104.99 105.08	105.04	0.07	
Asfalto Base + MPA 0.03%	1	1	117.27 117.06	109.29 109.30	113.28 113.18	113.23	0.07		
		2	123.09 123.20	120.60 120.70	121.85 121.95	121.90	0.07		
	2	1	92.67 92.88 92.68	92.20 92.40 92.36	92.43 92.64 92.52	92.53	0.10		
		2	103.50 104.64 103.83	100.51 100.72 100.67	102.01 102.68 102.25	102.31	0.34		

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.

Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485

e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Código: IRF-1
			Versión: 3
	INFORME DE RESULTADOS		Página 4 de 24

Asfalto Base + MPA 0.05%	2	1	126.00	127.70	126.85	126.09	0.70
			124.68	126.25	125.46		
			124.92	127.01	125.97		
		2	110.71	120.90	115.81	115.78	0.23
110.92	121.07		116.00				
110.41	120.68		115.55				
Asfalto Base + MPA 0.07%	1	1	107.05	95.85	101.45	101.65	0.4
			102.11	96.44	102.11		
			106.78	95.99	101.39		
		2	132.99	124.05	128.52	128.02	0.43
	132.30		123.17	127.73			
	132.46		123.16	127.81			
	2	1	123.83	124.05	123.94	123.57	0.53
			123.01	123.38	123.20		
115.42			117.17	116.29			
2		115.46	117.83	116.64	116.47	0.25	

En la **Tabla 2** se presentan los resultados de los análisis de tensión interfacial para las 7 muestras de asfaltos.

Tabla 2. Resultados de las medidas de tensión superficial para las 7 muestras de asfalto.

Fluido	No. de medida	Tensión Superficial [mN/m]	Promedio Tensión Superficial [mN/m]	Desviación
Asfalto Base	1	68.53	69.76	1.74
	2	70.99		
Asfalto Base + Comercial 0.03%	1	27.13	27.84	1.00
	2	28.55		
Asfalto Base + Comercial 0.05%	1	34.37	33.9	0.67
	2	33.42		
Asfalto Base + Comercial 0.07%	1	35.65	35.65	0.00
	2	35.65		
Asfalto Base + MPA 0.03%	1	66.85	65.49	1.93
	2	64.12		
Asfalto Base + MPA 0.05%	1	30.48	30.43	0.07
	2	30.72		
Asfalto Base + MPA 0.07%	1	37.72	39.36	2.31
	2	40.99		

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS.
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.
Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485
e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 5 de 24

En la **Tabla 3** se presentan los resultados para la tensión superficial de agua destilada.

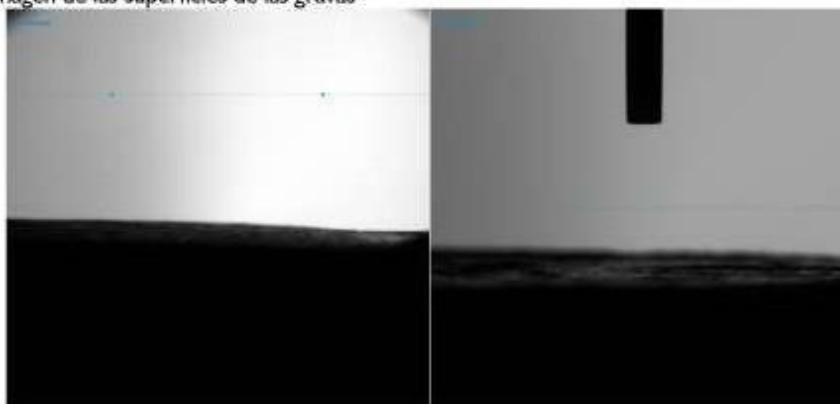
Tabla 3. Resultados de tensión superficial de agua destilada.

Fluido	No. de medida	Tensión Superficial [mN/m]	Componente Polar	Componente Apolar
Agua	1	72.21	50.59	21.62
	2	72.84	51.03	21.82
	3	72.52	50.80	21.72
Promedio		72.52	50.81	21.72
Desviación		0.32	0.22	0.09

FIGURAS

A continuación, se presentan algunas imágenes de las mediciones de los siete (7) asfaltos y las dos (2) gravas, entregados por el cliente. Las demás imágenes se encuentran en el archivo rar adjunto, esta organizado por carpetas con el nombre del respectivo asfalto analizado.

Figura 1: imagen de las superficies de las gravas



Grava 1

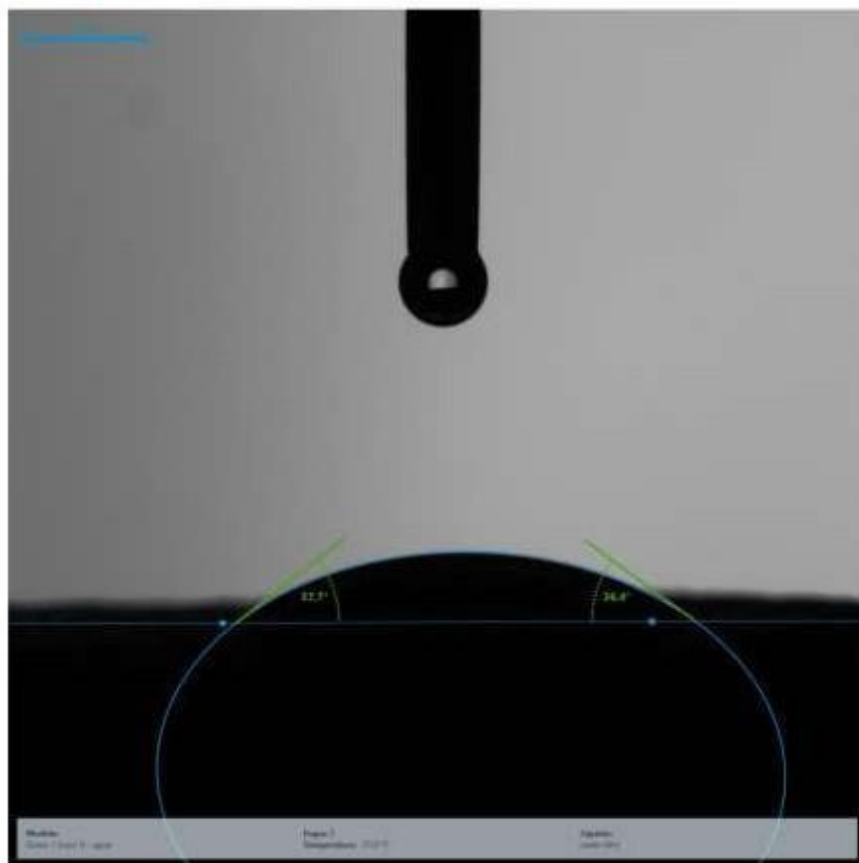
Grava 2

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.
Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485
e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 6 de 24
INFORME DE RESULTADOS		

Figura 2: imagen de ángulo de contacto de la grava I-medición I con agua destilada.



PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

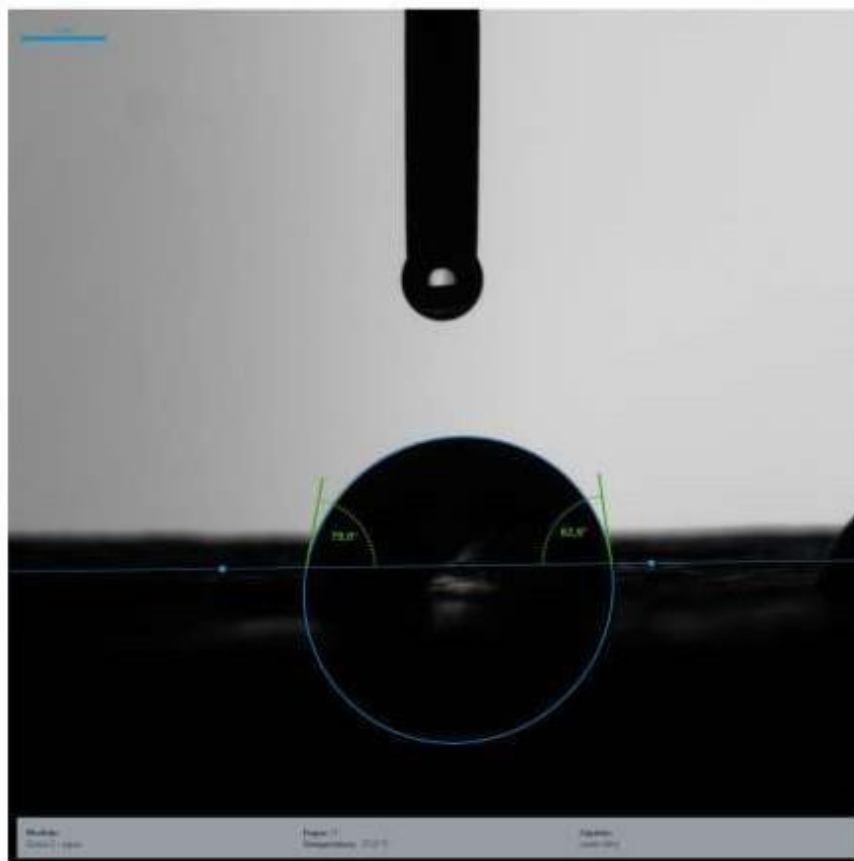
Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.

Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485

e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 7 de 24
INFORME DE RESULTADOS		

Figura 3: imagen de ángulo de contacto de la grava 2-medición 3 con agua destilada.



PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS.
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.

Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485

e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATALISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 8 de 24
INFORME DE RESULTADOS		

Figura 4: imagen de ángulo de contacto de la grava 1-gota 2-medición 2 con asfalto base.



PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS.
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VALIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

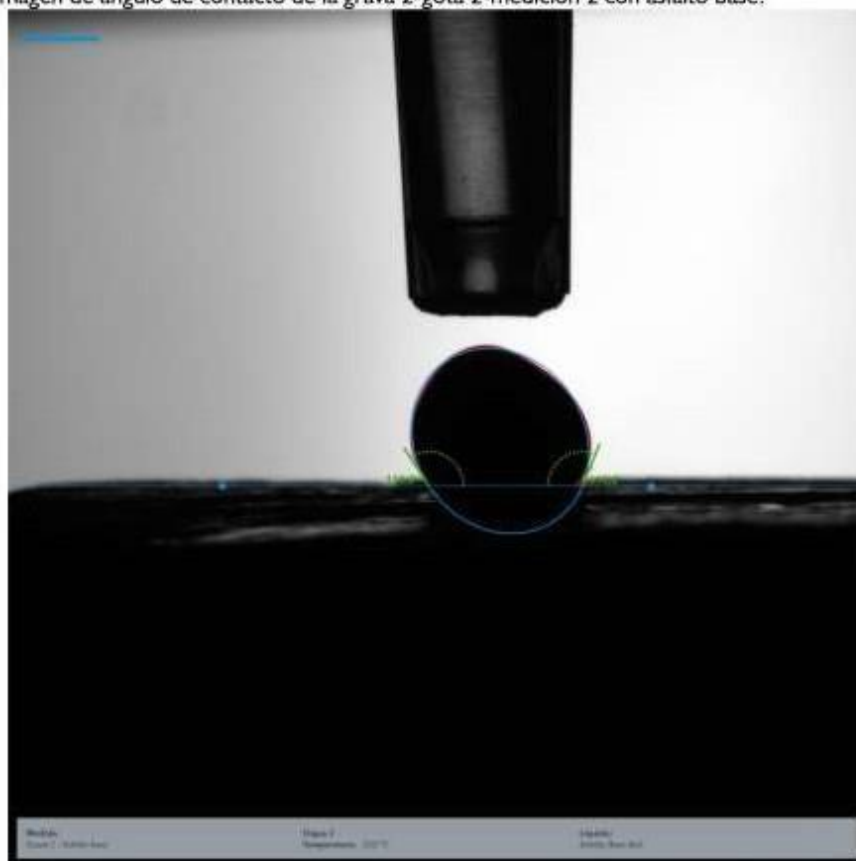
Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.

Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485

e-mail: cicat@uis.edu.co

 	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 9 de 24
INFORME DE RESULTADOS		

Figura 5: imagen de ángulo de contacto de la grava 2-gota 2-medición 2 con asfalto base.



PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.

Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485

e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
	INFORME DE RESULTADOS	Versión: 3
		Página 10 de 24

Figura 6: imagen de ángulo de contacto de la grava 1-gota 2-medición 3 con asfalto base más comercial 0.03%.

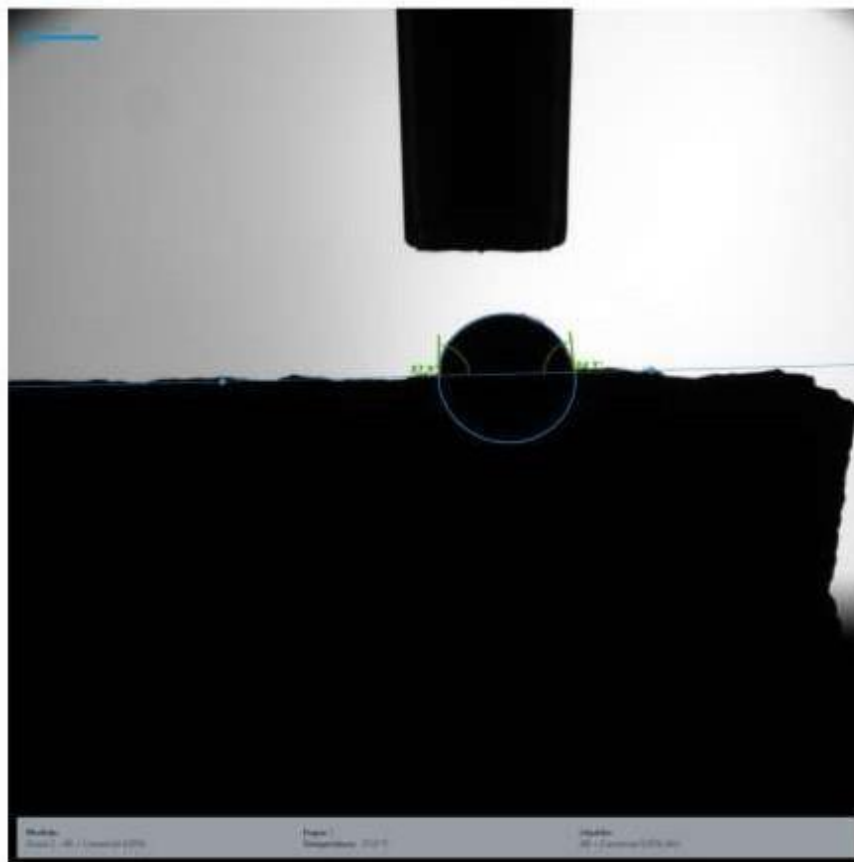


PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS.
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VALIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.
Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485
e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 11 de 24
INFORME DE RESULTADOS		

Figura 7: imagen de ángulo de contacto de la grava 2-gota 1-medición 1 con asfalto base más comercial 0.03%.



PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS.
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VALIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

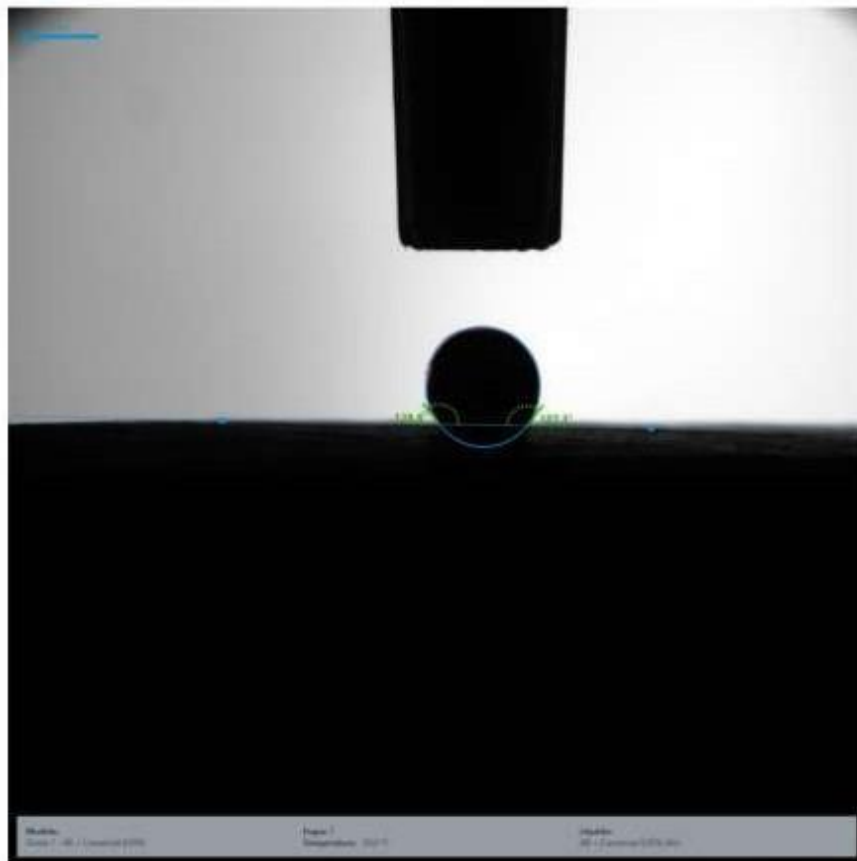
Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.

Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485

e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
	INFORME DE RESULTADOS	Versión: 3
		Página 12 de 24

Figura 8: imagen de ángulo de contacto de la grava 1-gota 2-medición 3 con asfalto base más comercial 0.05%.



PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS.
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

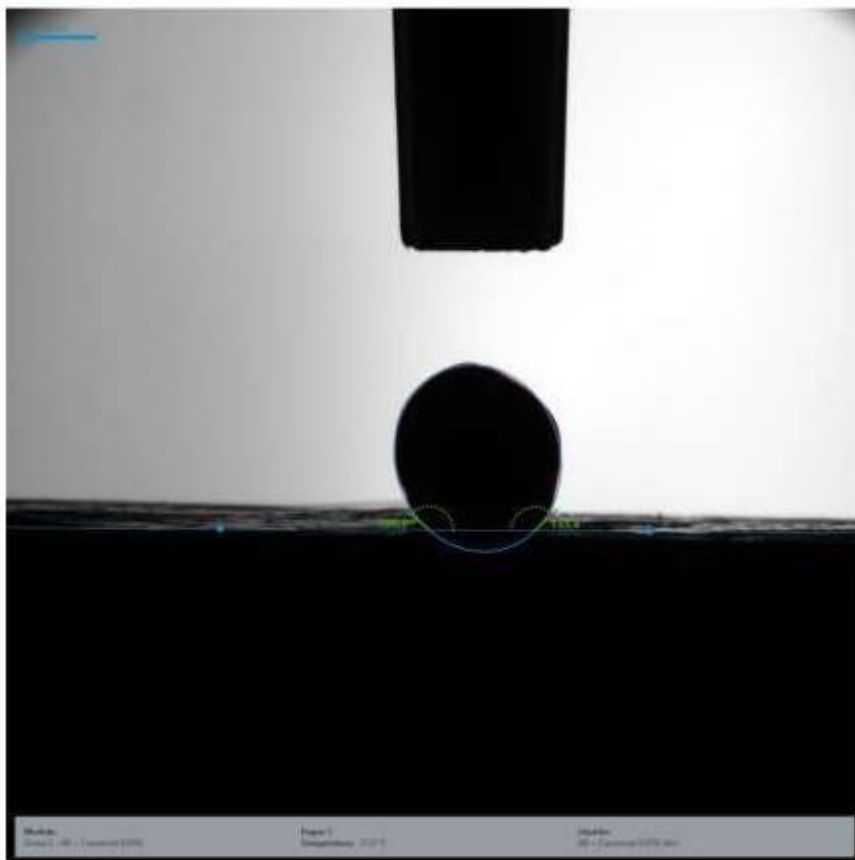
Parque Tecnológico Guatimar, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.

Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485

e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 13 de 24
INFORME DE RESULTADOS		

Figura 9: imagen de ángulo de contacto de la grava 2-gota 2-medición 2 con asfalto base más comercial 0.05%.



PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

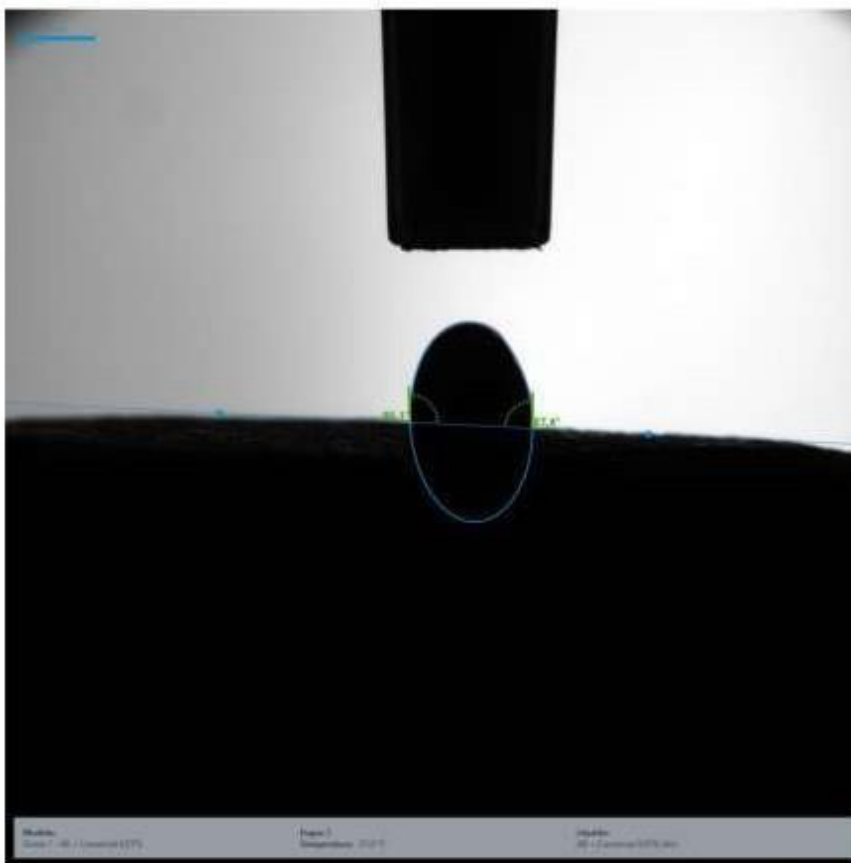
Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.

Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485

e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
	INFORME DE RESULTADOS	Página 14 de 24

Figura 10: imagen de ángulo de contacto de la grava l-gota l-medición 2 con asfalto base más comercial 0.07%.

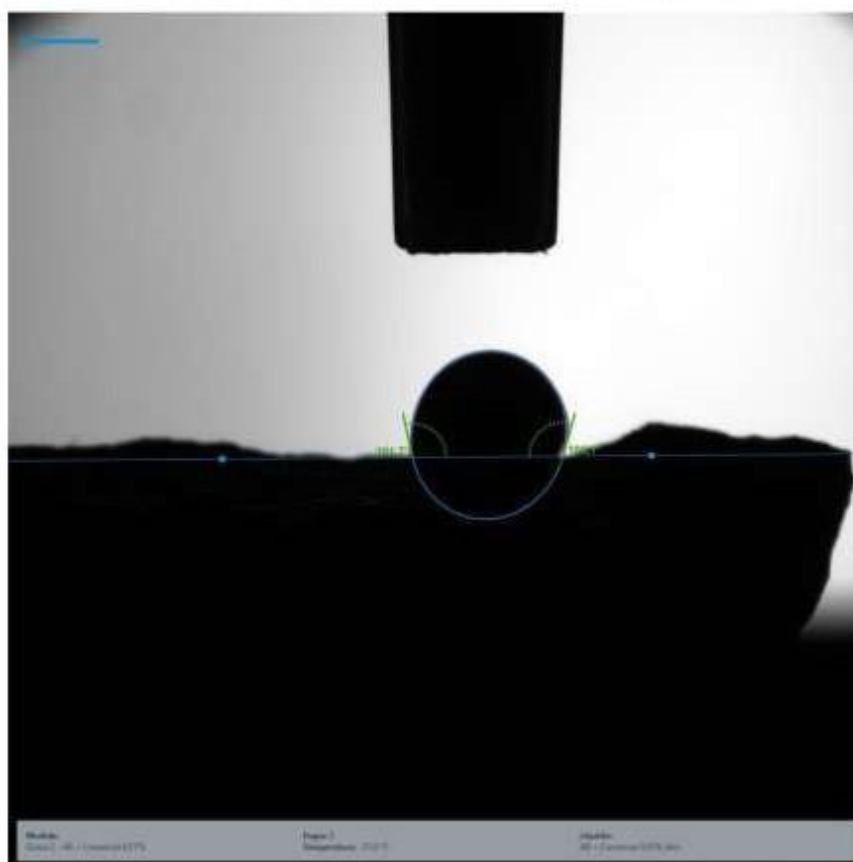


PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS.
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatimar, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.
Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485
e-mail: cicat@uis.edu.co

 	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 15 de 24
INFORME DE RESULTADOS		

Figura 11: imagen de ángulo de contacto de la grava 2-gota 1-medición 1 con asfalto base más comercial 0.07%.

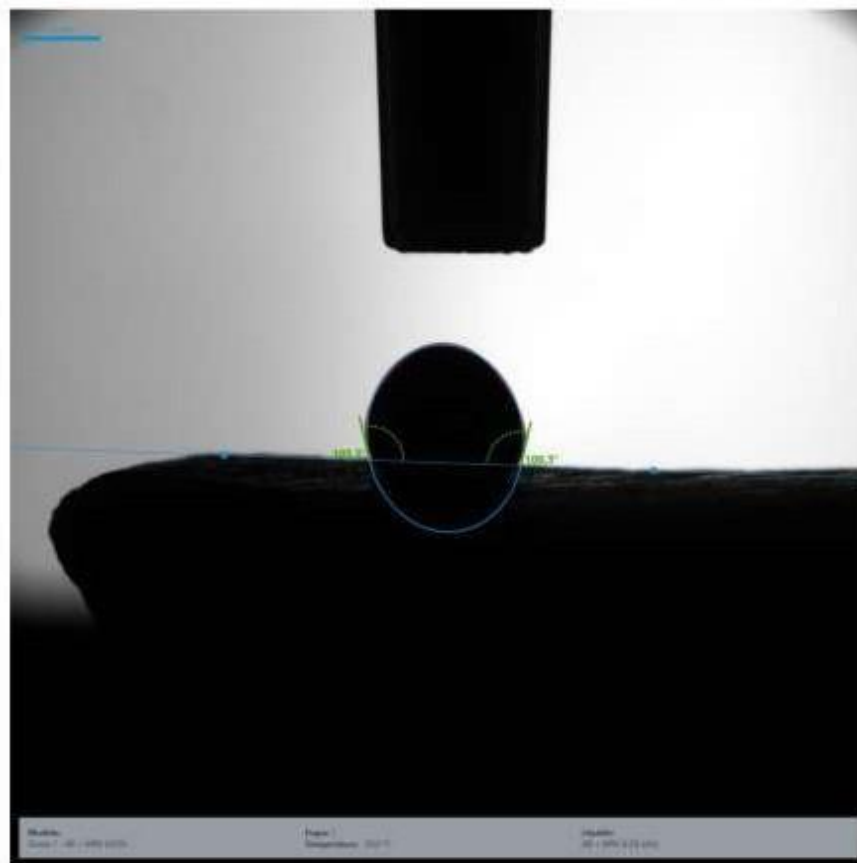


PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS.
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.
Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485
e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
	INFORME DE RESULTADOS	Versión: 3
		Página 16 de 24

Figura 12: imagen de ángulo de contacto de la grava |-gota |-medición | con asfalto base más MPA 0.03%.

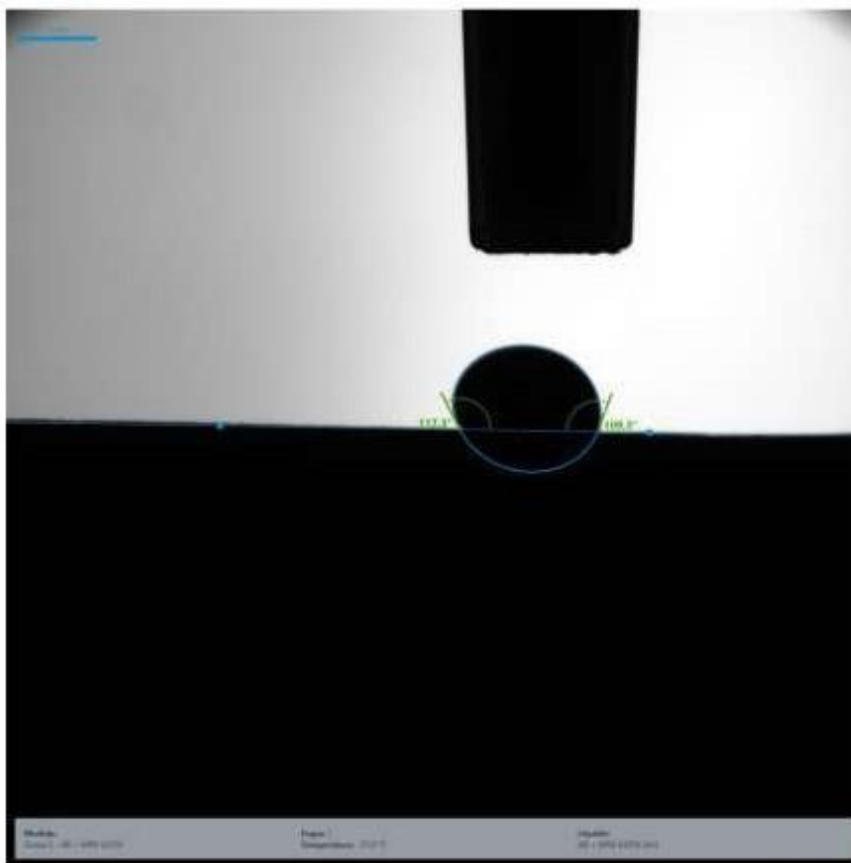


PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS.
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.
Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485
e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 17 de 24
INFORME DE RESULTADOS		

Figura 13: imagen de ángulo de contacto de la grava 2-gota 1-medición 1 con asfalto base más MPA 0.03%.

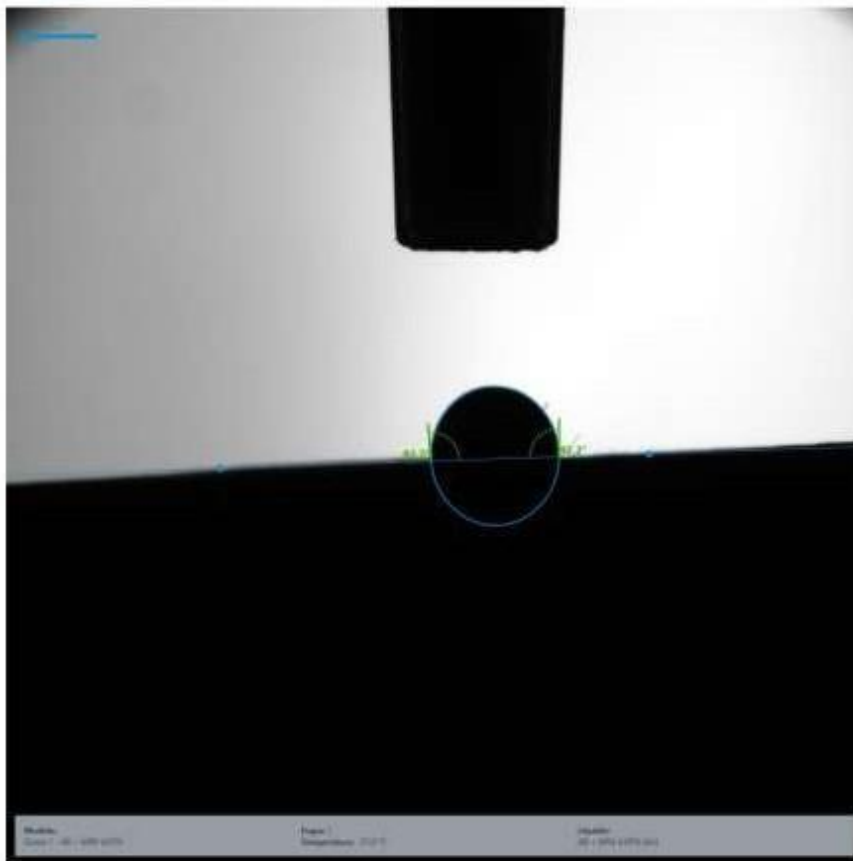


PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS.
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.
Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485
e-mail: cicat@uis.edu.co

	CIGAT CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 18 de 24
INFORME DE RESULTADOS		

Figura 14: imagen de ángulo de contacto de la grava |-gota |-medición | con asfalto base más MPA 0.05%.

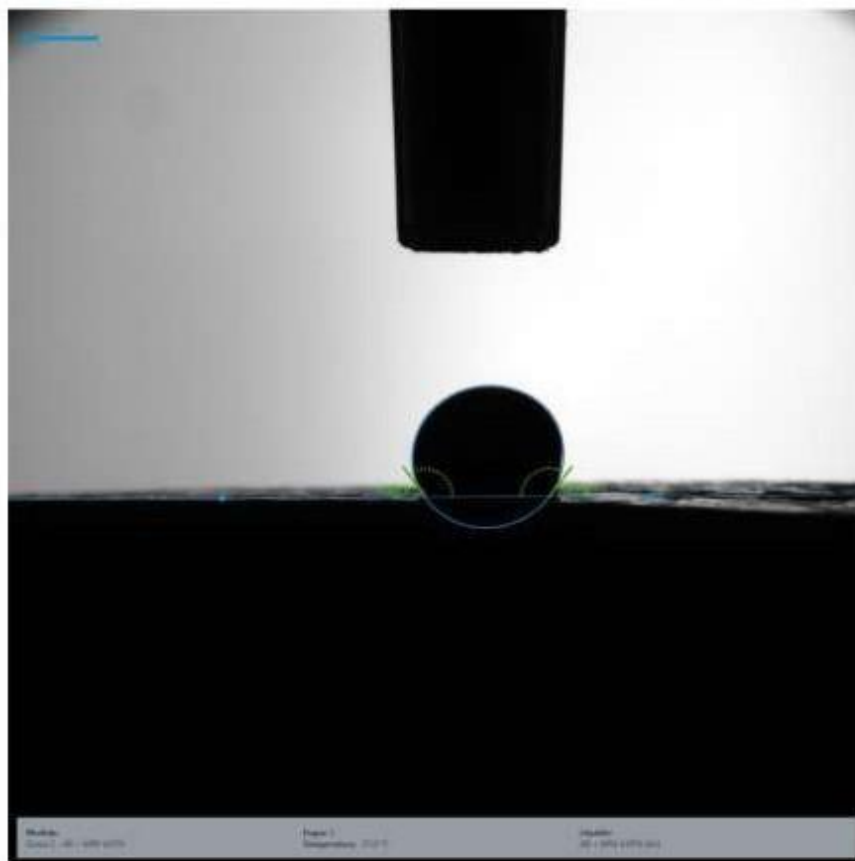


PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS.
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.
Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485
e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 19 de 24
INFORME DE RESULTADOS		

Figura 15: imagen de ángulo de contacto de la grava 2-gota 1-medición 3 con asfalto base más MPA 0.05%.

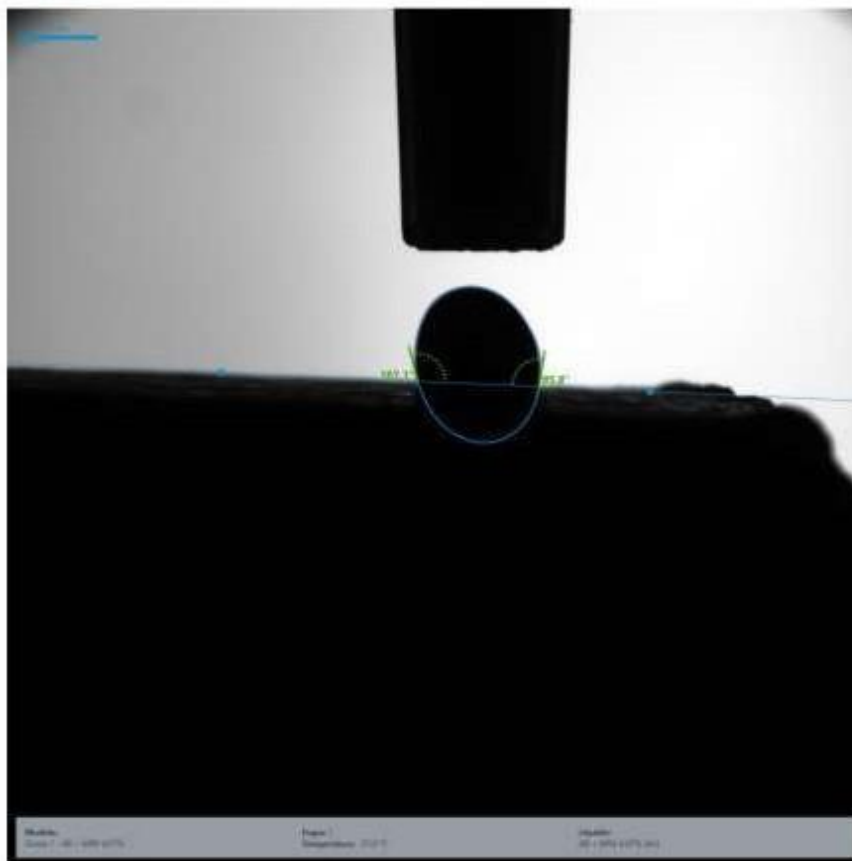


PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.
Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485
e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 20 de 24
INFORME DE RESULTADOS		

Figura 16: imagen de ángulo de contacto de la grava |-gota |-medición | con asfalto base más MPA 0.07%.

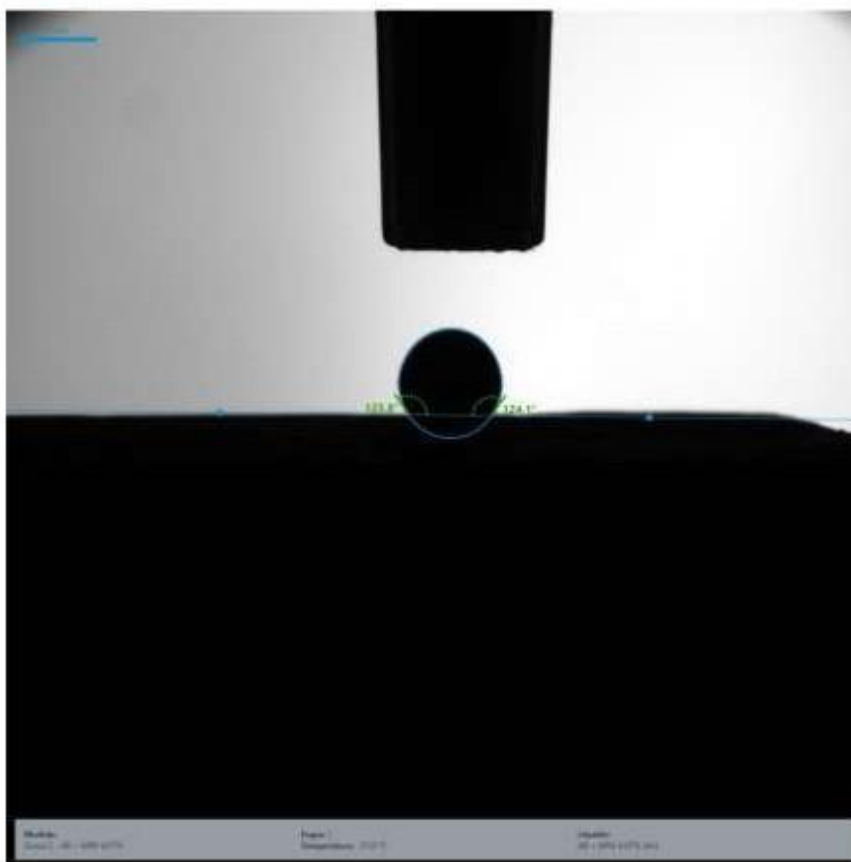


PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS.
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.
Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485
e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 21 de 24
INFORME DE RESULTADOS		

Figura 17: imagen de ángulo de contacto de la grava 2-gota 1-medición 1 con asfalto base más MPA 0.07%.



PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS.
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

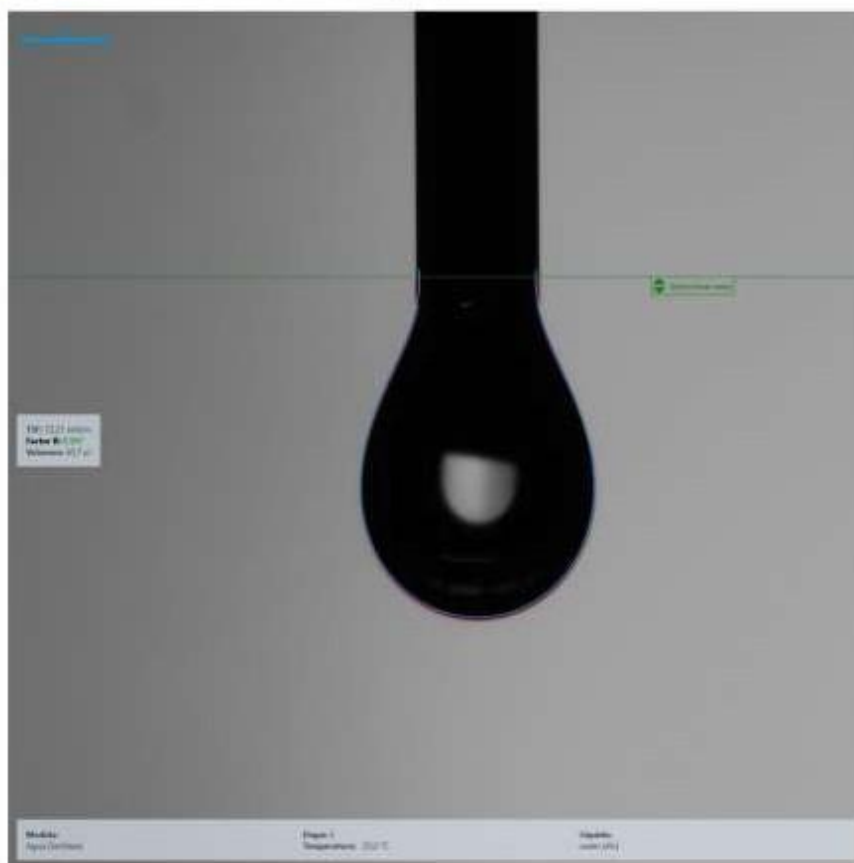
Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.

Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485

e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 22 de 24
INFORME DE RESULTADOS		

Figura 18: imagen de tensión superficial del agua destilada



PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS.
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatigará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.

Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485

e-mail: cicat@uis.edu.co

	CENTRO DE INVESTIGACIONES EN CATÁLISIS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Código: IRF-1
		Versión: 3
		Página 23 de 24
INFORME DE RESULTADOS		

Los resultados de ángulo de contacto y tensión superficial obtenidos para cada muestra se anexan en formato XLS. y PNG., que se encuentran en carpetas con el nombre de cada muestra analizada, en el archivo rar adjunto.

Observaciones

Durante los análisis se trato de mantener la fluidez de los asfaltos para cumplir con los protocolos de las mediciones, sin embargo, el asfalto se solidificaba de manera casi inmediata, por tal motivo se observa en las imágenes anexas que algunas gotas son algo deformes.

Conclusión

De los resultados de ángulo de contacto con agua se puede concluir que la grava 1 es más hidrofílica que la grava 2, ver ilustración 2 y 3, donde se observa que la grava 1 tiene menores resultados de ángulo de contacto, durante la medición el agua tendía a adsorberse, mientras que, la grava 2 podría decirse que tiene una mayor tendencia a ser hidrofóbica.

Realizado por:
Leonela Díaz Amado
Rodrigo Valderrama Zapata
Ingenieros Químicos


VoBo: Luz Marina Ballesteros Rueda
Profesora Investigadora del Centro de Investigaciones en Catálisis

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS
LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VALIDOS ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) RECIBIDA(S).

Parque Tecnológico Guatiguará, km 2 vía a Refugio Piedecuesta, Colombia, Edificio de Investigaciones, Laboratorio 105.
Teléfono: +607 634 4000 Ext. 3531, 1485
e-mail: cicat@uis.edu.co



Apéndices B. Laboratorio de composición química por tipo de agregado mineral.

Página 1 de 3




		LABORATORIO DE RAYOS X		Código: F.T.D.04
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Versión: 02
		INFORME DE RESULTADOS		
Fecha (aaaa-mm-dd)	2022/08/17	INFORME N°	INF-22250-FRX	
DATOS DEL CLIENTE				
Empresa	MULTINSA			
Nombre	Carlos Andrés Hernández Barros			
Dirección	Cra. 19 # 73-65 La libertad	NIT o C.C.	1088660527	
Ciudad	Barrancabermeja-Santander	Orden de Compra		
e-mail	carlos.hernandez@multinsa.com	Teléfono	3183393921	
TIPO DE ENSAYO				
Ensayo	FRX-02	Análisis elemental Cuantitativo por Fluorescencia de Rayos X (Ns-U). Muestras Minerales		
Observaciones	• Registro de datos y análisis de dos (2) muestras			
TOMA Y ANÁLISIS DE DATOS				
Fecha de Recepción de las Muestras (aaaa-mm-dd)	2022-08-03	Fecha de Registro (aaaa-mm-dd)	2022-08-03	
Tipo de Muestras	Inorgánico	Fecha de Análisis de Resultados (aaaa-mm-dd)	2022-08-10	
RESULTADOS OBTENIDOS				
De la Tabla 1 y Tabla 2 se describe los porcentajes elementales y en forma de óxidos de los especímenes seleccionados de las muestras identificadas con códigos internos 22-0541 y 22-0542				
Código interno de laboratorio	Referencia cliente	Descripción o Clasificación Preliminar de la muestra		
22-0541	Muestra 1	Material calizo (Piedra caliza) Peso: 10g		
22-0542	Muestra 2	Material silicio (Piedra silicea) Peso: 10g		


ADITIVO ORGANOSILANO MULTI-PROMOTOR DE ADHERENCIA (MPA) PARA ASFALTOS





		LABORATORIO DE RAYOS X		Código: F.T.D.84
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Versión: 02
		INFORME DE RESULTADOS		
Muestra N°	22-0541			
Tabla 1. Porcentaje cuantitativo en óxidos y elemental de la muestra identificada con código		22-0541		
ELEMENTO	CONCENTRACIÓN	COMPUESTO	CONCENTRACIÓN	
Si	15,48%	SiO ₂	33,12%	
Ca	4,51%	CaO	6,31%	
Al	4,40%	Al ₂ O ₃	8,32%	
Fe	3,84%	Fe ₂ O ₃	5,49%	
Mg	1,51%	MgO	2,50%	
S	0,86%	SO ₃	2,39%	
K	0,84%	K ₂ O	1,02%	
Na	0,81%	Na ₂ O	1,00%	
Ba	0,27%	BaO	0,30%	
Ti	0,25%	TiO ₂	0,41%	
Mn	0,06%	MnO	0,08%	
P	0,04%	P ₂ O ₅	0,10%	
Sr	0,02%	SrO	0,02%	
Cr	0,02%	Cr ₂ O ₃	0,02%	
Zr	0,01%	ZrO ₂	0,02%	
Cl	0,01%	Cl	0,01%	
Elementos minoritarios.				
ELEMENTO	CONCENTRACIÓN	COMPUESTO	CONCENTRACIÓN	
Zn	74 PPM	ZnO	92 PPM	
Cu	64 PPM	CuO	80 PPM	
Ni	56 PPM	NiO	71 PPM	
Rb	17 PPM	Rb ₂ O	19 PPM	
Nota:	Todos los compuestos están ordenados según su composición elemental. Se emplea CO ₂ para completar la matriz de cuantificación. Se identifica Ga y Co pero no son cuantificables.			




		LABORATORIO DE RAYOS X UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER INFORME DE RESULTADOS		Código: F.T.D-84 Versión: 02
Muestra N°	22-0542			
Tabla 2. Porcentaje cuantitativo en óxidos y elemental de la muestra identificada con código			22-0542	
ELEMENTO	CONCENTRACIÓN	COMPUESTO	CONCENTRACIÓN	
Si	32,10%	SiO2	68,68%	
Al	3,22%	Al2O3	6,08%	
Fe	0,84%	Fe2O3	1,19%	
K	0,60%	K2O	0,72%	
P	0,28%	P2O5	0,63%	
Ti	0,19%	TiO2	0,32%	
Ca	0,10%	CaO	0,14%	
Zr	0,06%	ZrO2	0,09%	
Ba	0,06%	BaO	0,06%	
Mg	0,05%	MgO	0,09%	
Sr	0,02%	SrO	0,02%	
S	0,01%	SO3	0,03%	
Elementos minoritarios				
ELEMENTO	CONCENTRACIÓN	COMPUESTO	CONCENTRACIÓN	
Cr	81 PPM	Cr2O3	0,01%	
Zn	51 PPM	ZnO	64 PPM	
Y	51 PPM	Y2O3	64 PPM	
Mn	46 PPM	MnO	60 PPM	
Cu	31 PPM	CuO	39 PPM	
Rb	20 PPM	Rb2O	22 PPM	
Nb	9 PPM	Nb2O5	13 PPM	
Nota:	Todos los compuestos están ordenados según su composición elemental. Se emplea CHO para completar la matriz de cuantificación. Se identifica Pd y As pero no son cuantificables.			
OBSERVACIONES				
Los resultados se relacionan únicamente a los especímenes de las muestras analizadas. Si desea expresar su percepción con respecto al presente servicio o ensayo, hágalo por medio del correo electrónico calidadrx@uis.edu.co o al PBX: (57-7) 6344000 extensión: 3512. No se debe reproducir el informe de ensayo excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del laboratorio.				
Atentamente:				
Elaboró		Revisó		Aprobó
				
Diego Fernando Hernández Pardo Profesional Laboratorio Rayos X MSc Ingeniería de Materiales SF231-69869		José Antonio Henao Martínez Director Laboratorio de Rayos X PhD-MSc -Químico PQ-0321		José Antonio Henao Martínez Director Laboratorio de Rayos X PhD-MSc -Químico PQ-0321

Apéndices C. Ensayo de prueba de agua hirviendo (INVIAS 757).

Evidencias fotográficas (aditivo: comercial - agregado de cantera)	
0,03% aditivo comercial + agregado cantera	
0,05% aditivo comercial + agregado cantera	
0,07% aditivo comercial + agregado cantera	
Evidencias fotográficas (aditivo: MPA - agregado de cantera)	

<p>0,03% aditivo MPA + agregado cantera</p>	
---	---

<p>0,05% aditivo MPA + agregado cantera</p>	
<p>0,07% aditivo MPA + agregado cantera</p>	
<p>Evidencias fotográficas (aditivo: comercial - agregado de río)</p>	
<p>0,03% aditivo comercial + agregado río</p>	
<p>0,05% aditivo comercial + agregado río</p>	

<p>0,07% aditivo comercial + agregado río</p>	
<p>Evidencias fotográficas (aditivo: MPA - agregado de río)</p>	
<p>0,03% aditivo MPA + agregado río</p>	
<p>0,05% aditivo MPA + agregado río</p>	
<p>0,07% aditivo MPA + agregado río</p>	