



Vigilada Mineducación

**EMULSIONES ASFÁLTICAS CON ADICIÓN DE NANOSÍLICE
ASPHALT EMULSIONS WITH NANOSILICA ADDITION**

**EDGAR ARTURO CALONGE VARGAS
ARTÍCULO DE GRADO**

**Asesor
JULIÁN VIDAL VALENCIA**

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2023**

CONTENIDO

RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN.....	5
OBJETIVOS	7
DESARROLLO DEL TRABAJO	8
RESULTADOS.....	25
CONCLUSIONES	26
REFERENCIAS	27

RESUMEN

El objetivo de esta investigación radica en analizar la reacción de las emulsiones asfálticas ante la incorporación de nanocompuestos para mejorar las propiedades y características de estas. Para tal fin se realizaron ensayos con emulsiones asfálticas convencionales CRL-1 y CRR-1 en las cuales se agregó 5% y 10% de nanosílice líquida, en virtud, del peso de cada muestra, la cual fue sometida durante una hora a una velocidad de agitación de 250 RPM a temperatura ambiente de 23 °C. De manera, que se pudo apreciar en los resultados obtenidos, que la nanosílice cambia sus propiedades, de modo que tal componente se convierte en una alternativa fundamental para generar materiales con propiedades específicas mucho más sostenibles.

Palabras Claves: Asfalto, emulsión, emulsiones asfálticas, nanosílice.

ABSTRACT

The objective of this research is to analyze the reaction of asphalt emulsions to the incorporation of nanocomposites to improve their properties and characteristics. For this purpose, tests were carried out with conventional asphalt emulsions CRL-1 and CRR-1 in which 5% and 10% of liquid nanosilica were added, by virtue of the weight of each sample, which was subjected for one hour at an agitation speed of 250 RPM at room temperature of 23 °C. Thus, it could be appreciated in the results obtained, that nanosilica changes its properties, so that such component becomes a fundamental alternative to generate materials with much more sustainable specific properties.

Keywords: Asphalt, emulsion, asphalt emulsions, nanosilica.

INTRODUCCIÓN

Dentro de los elementos fundamentales para el adecuado desarrollo de un país se encuentra la necesidad de tener una apropiada infraestructura vial, no obstante, y en virtud, de las distintas problemáticas financieras y ambientales que son notorias con el pasar de los años, se hace fundamental plantear alternativas de bajo costo que permitan el avance respecto a la creación de componentes o materiales que faciliten el progreso de nuestros territorios, y que técnicamente sean aceptables, por tal razón, las emulsiones asfálticas se convierten en una alternativa viable, en tanto, proporcionan ventajas como: “la facilidad de mezclado, temperaturas de aplicación bajas, menores problemas de contaminación ambiental, además es versátil teniendo en cuenta las características de los agregados propios de cada región lo que proporciona un ahorro de energía y bajos costos de producción” (Gómez Huanca, 2017, pág. 9).

Las emulsiones más utilizadas en la pavimentación de vías son las catiónicas, es decir, las que tienen carga positiva, que, a su vez, pueden clasificarse dependiendo del requerimiento donde sean aplicadas: pueden presentarse en CRR-1, que suponen que es catiónica de rompimiento rápido, y contiene una pequeña cantidad de fluxante¹ colocada en riego de liga, tratamientos superficiales y sello. Por otro lado, puede ser CRM denominada catiónica de rompimiento medio, que contiene cantidades apreciables de fluxante, situada en elaboración de mezclas abiertas. También se habla de CRL-1 que significa que es catiónica de rompimiento lento, con capacidad de adherencia alta a la superficie de contacto y que se presenta en diferentes tipos de riego, mezcla densa, bases estabilizadas, micro superficies entre otros (Mendoza Giraldo, 2016, pág. 15). No obstante, para el presente trabajo de investigación, se incorpora nanosílice a emulsiones CRR-1 y CRL-1 comerciales para mejorar características de la emulsión asfáltica y asfalto con el fin de obtener una mezcla con mejor desempeño.

A su vez, las emulsiones asfálticas catiónicas presentan carga positiva las cuales son atraídas por la carga eléctrica negativa de los agregados pétreos, es decir, que los glóbulos asfálticos presentes en las emulsiones tienen la capacidad de quedar fijos y adheridos al agregado; este proceso se conoce como formación de puente químico y consta de una reacción al inicio del rompimiento de la emulsión que produce que la consistencia final sea lograda con la evaporación total del agua (Muñiz, 2022).

La adición de nanocompuestos a lo largo del tiempo se ha venido utilizando de manera constante en diferentes sectores de la industria debido a las propiedades que contiene y a los estudios que se han venido realizando en los cuales se ha determinado que se han encontrado mejoras en tanto los asfaltos como en las mezclas asfálticas, frente a la fatiga, daños presentados por humedad, ahuellamientos y fisuras, al igual que en la adición de nanomateriales, mejoras, envejecimiento y comportamiento reológico del ligante. De manera que es un

¹ Fracción de petróleo empleada para ablandar el asfalto.

compuesto que evidentemente “busca transformar desde el interior la eficiencia del material, en donde se saca provecho de la magnitud del material y la influencia de este a la mezcla de concreto (Loaiza Osorio, Díaz Gonzalez, & Rojas Manzano, 2019). En ese mismo orden de ideas, “ofrece oportunidades en el sector de la construcción, generando materiales con propiedades específicas y avanzadas como mayores resistencias mecánicas, mayor durabilidad, resistencia a la corrosión, resistencia al fuego...” (Tsotsis, 2018, pág. 9).

Así pues, “...la nanosílice es un nanocompuesto que es como se denomina generalmente al polvo amorfo de dióxido de silicio de tamaño nanométrico con una gran área específica. Se fabrica bajo diferentes métodos de producción, como sol-gel, vaporización, precipitación o procesos biológicos” (Morea & Pique, pág. 2). Este compuesto genera la aceleración de la ceniza volante en los concretos comunes, haciéndolos más densos y compactos, que, a su vez, mejoran el desempeño y disminuyen los costos (Dávila, Da Costa, & Duarte, 2013).

OBJETIVOS

GENERAL

- Analizar la reacción de las emulsiones asfálticas ante la incorporación de nanocompuestos para mejorar las propiedades y características mediante la realización de ensayos con emulsiones asfálticas convencionales CRL-1 y CRR-1.

ESPECÍFICOS

- Identificar la importancia de la adición de nanocompuestos en las emulsiones asfálticas.
- Evaluar el comportamiento de las emulsiones asfálticas convencionales respecto a la adición de nanosílice.
- Evidenciar las mejoras de la adición de nanosílice respecto a las emulsiones asfálticas convencionales.

DESARROLLO DEL TRABAJO

El presente estudio se desarrolló con emulsiones asfálticas convencionales, CRL-1 y CRR-1, a las que se les agregó 5% y 10% de nanosílice líquida (NS), en virtud del peso de cada muestra; tal procedimiento se llevó a cabo mediante el uso de recipientes de vidrio, en los que eran vertidas las emulsiones a estudio, y que luego, fueron sometidas durante una hora a una velocidad de agitación de 250 RPM a temperatura ambiente de 23°C.

Para poder obtener una mejor descripción de las reacciones se realizaron en primer lugar, ensayos únicamente con las emulsiones asfálticas y posteriormente, se le adicionó la nanosílice líquida, de manera que, en razón del mismo procedimiento y potencial de envejecimiento se pudieran contrastar los resultados obtenidos.

Las emulsiones asfálticas que se evidenciarán a lo largo de la investigación se identificarán con las siguientes nomenclaturas: CRR-1 y CRL-1 (Sin NS), CRR+5%, CRR+10%, CRL+5% y CRL+10% (Con 5% y 10% de contenido de nanosílice según el peso de la emulsión).

En la Tabla 1 y 2 se evidencian los resultados de las características de los materiales utilizados en la presente investigación.

Tabla 1. Principales Propiedades de las Emulsiones CRR-1 por Rocales y Concreto.

ESPECIFICACIONES INVIAS ART. 411, TABLA 411-1					
CARACTERISTICAS	UNIDADES	NORMA ENSAYOS	EMULSION		RESULTADO CRR-1
			MIN	MAX	
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C		E-763	20	100	27
Contenido de Agua en Volumen	%	E-761	-	40	39.57
Estabilidad en Almacenamiento (24 horas), Sedimentación (a los 5 días)	%	E-764	-	1	0.89
				5	1.03
Destilación	%	E-762	60	-	60.43
Contenido de Asfalto Residual		E-762	60	-	60.43
Contenido de Aceite		E-762	-	3	0
Tamizado. Retenido Tamiz No. 20	%	E-765	-	0.1	
Demulsibilidad %	%	E-766	40	-	70.26
Carga de Partícula	-	E-767	Positiva		Positiva
pH		E-768	-	6	2.42
ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO DE DESTILACIÓN					
Penetración (25°C, 100g, 5s)	0.1mm		60	100	60
Ductibilidad a 25°C	cm		40	-	98
Solubilidad en Tricloroetileno	%		97.5	-	99.99

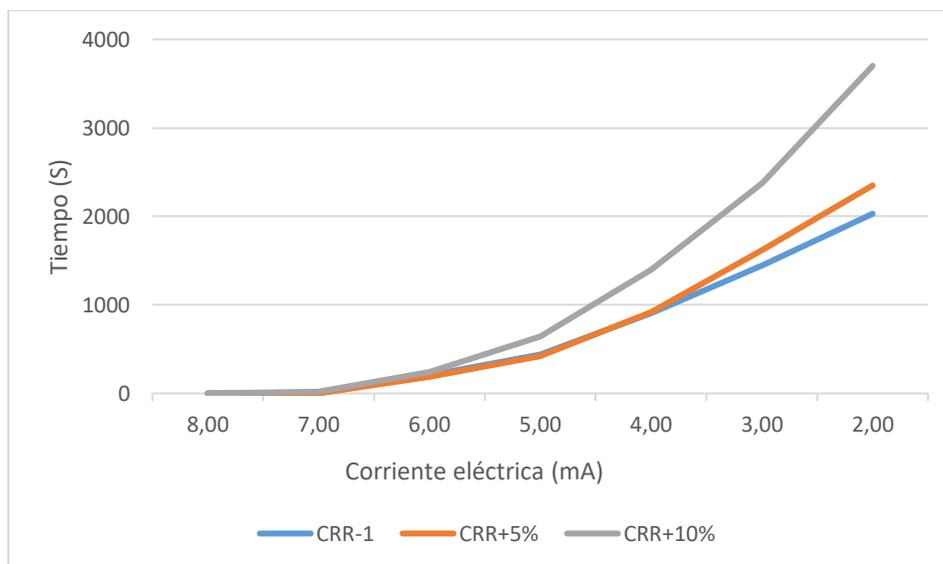
Tabla 2. Propiedades Físicas y Químicas del Nanosílice por Master Builders.

PROPIEDADES	
Aspecto Físico	Líquido blanco
Densidad, 20°C	1.134 +/-0.33 gr/cm ³
pH, 20°C	10 +/- 1
Viscosidad 20°C Brookfield Sp00/100rpm	< 30 cps
Residuo Seco 130°C	22+/- 1.5%
Cloruros	< 0.1%

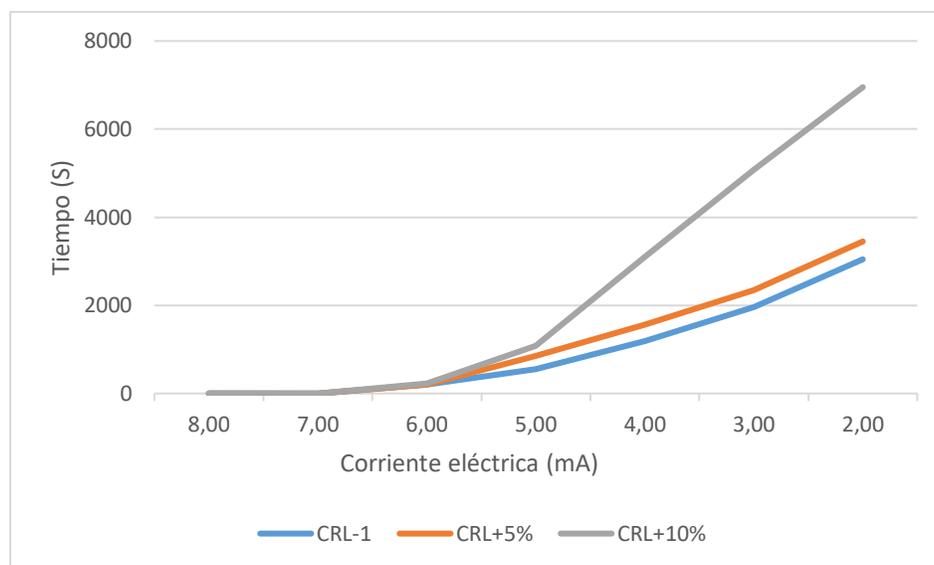
ENSAYOS

1. Carga Eléctrica de la Partícula

El objetivo de esta prueba radica en identificar las emulsiones a través de la polaridad eléctrica de sus glóbulos de asfalto, de manera que se pueda precisar cuándo las emulsiones sean aniónicas, es decir, que los glóbulos tengan carga eléctrica negativa o en su defecto, cuando las emulsiones sean catiónicas, es decir, que los glóbulos tengan carga eléctrica positiva. A su vez, a partir de este ensayo se puede estimar el rompimiento de la emulsión en función del tiempo, como se presenta en las gráficas 1 y 2.



Gráfica 1. Miliamperes vs Tiempo de CRR + Nanosílice.



Gráfica 2. Miliamperes vs Tiempo de CRL + Nanosílice.

En virtud de lo anterior, se pudo observar que los glóbulos asfálticos de las emulsiones estudiadas luego de someterse tanto a rompimiento lento como rápido son emulsiones catiónicas, es decir, de carga positiva. Correlativamente se pudo evidenciar que a mayor porcentaje de nanosílice agregada a la emulsión ésta se comporta de manera diferente a las convencionales², en la cual la carga eléctrica tiene un incremento del tiempo al llegar a los 2mA.

En el presente ensayo, se evidenció una diferencia significativa entre las emulsiones modificadas con Nanosílice, donde hubo un incremento del 13% a CRL+5% y 128% a CRL+10% y del 16% a CRR+5% y 82% a CRR+10% respecto a su rompimiento en variación del tiempo; siendo las emulsiones CRL-1 aquellas que presentan un mayor porcentaje de rompimiento.

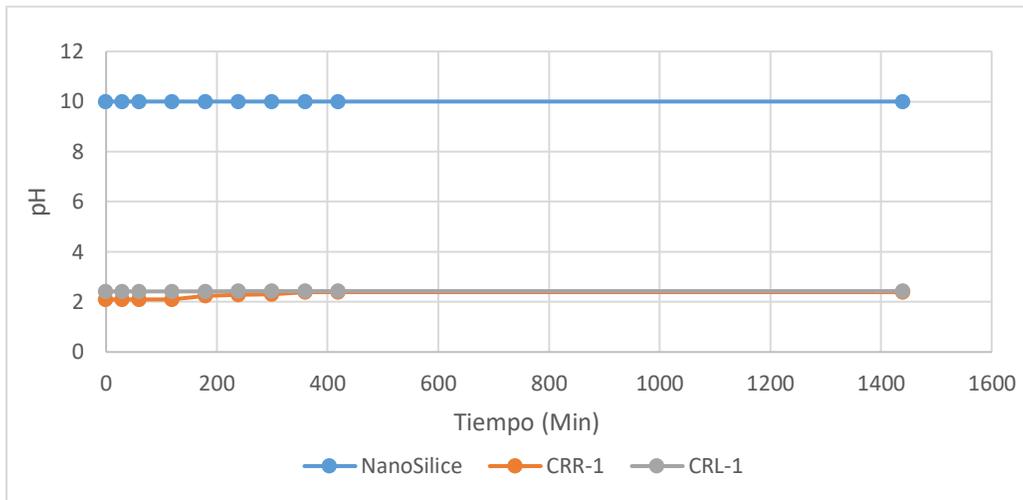
A medida que se aumenta el porcentaje de nanosílice mayor será el tiempo de rompimiento.

2. Determinación de Potencial de Hidrogeno (pH)

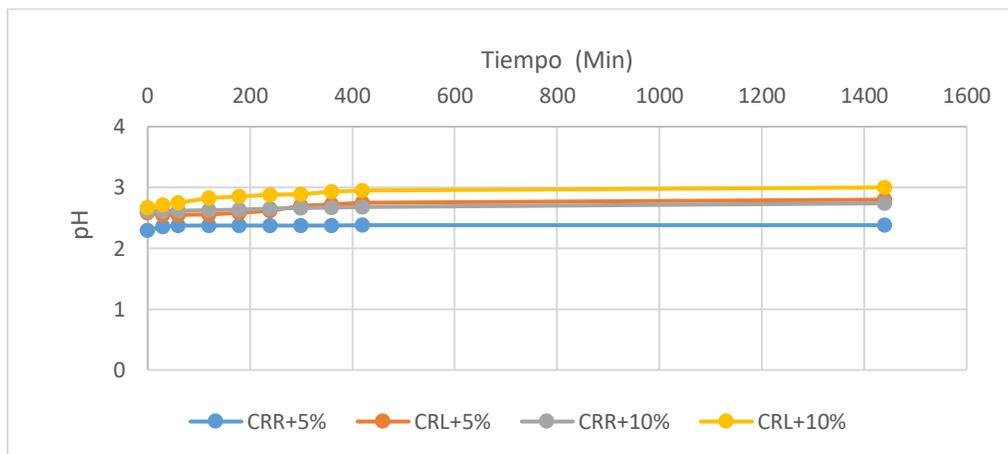
Esta prueba consiste en determinar el potencial de hidrógeno de las emulsiones asfálticas, modificadas o sin modificar, objeto de estudio, y es fundamental en virtud de que permite clasificar el tipo de emulsión en aniónica o catiónica, si es ácida o básica y conocer el comportamiento de estas con el nanocompuesto.

Se tomaron datos en el tiempo para evidenciar la variación del pH y estimar el momento en el que este se vuelve constante. Primeramente, se realizó la determinación de pH a la nanosílice, CRR-1 y CRL-1, evidenciada en la gráfica 3 y luego con sus respectivas adiciones de nanosílice como se muestra en la gráfica 4.

² Estás entendidas como aquellas que no tienen incorporación de nanosílice.



Gráfica 3. pH de Nanosílíce y Mezcla Asfáltica CRR-1 y CRR-1.



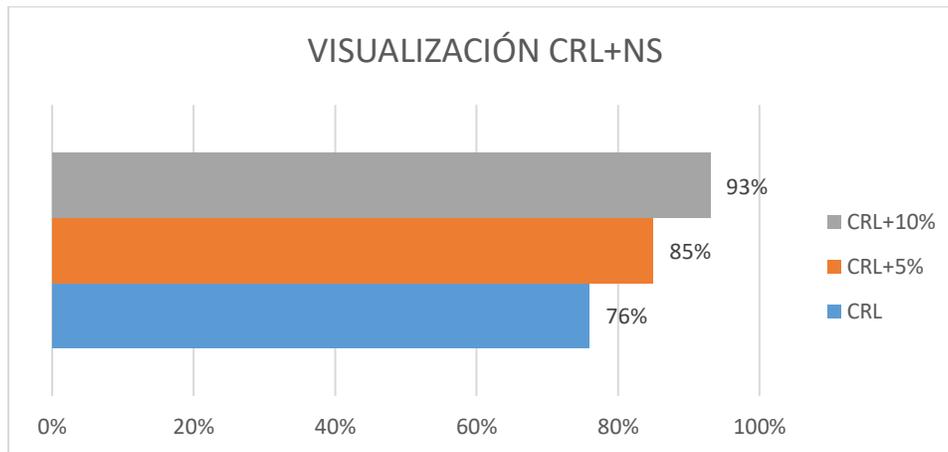
Gráfica 4. pH de CRR+5% vs tiempo, pH de CRL+5% vs tiempo, pH de CRR+10% vs tiempo y pH de CRL+10% vs tiempo.

Con base a la gráfica 4, se observa que el pH tiende a estabilizarse en las emulsiones modificadas a partir de 12 horas (720 minutos).

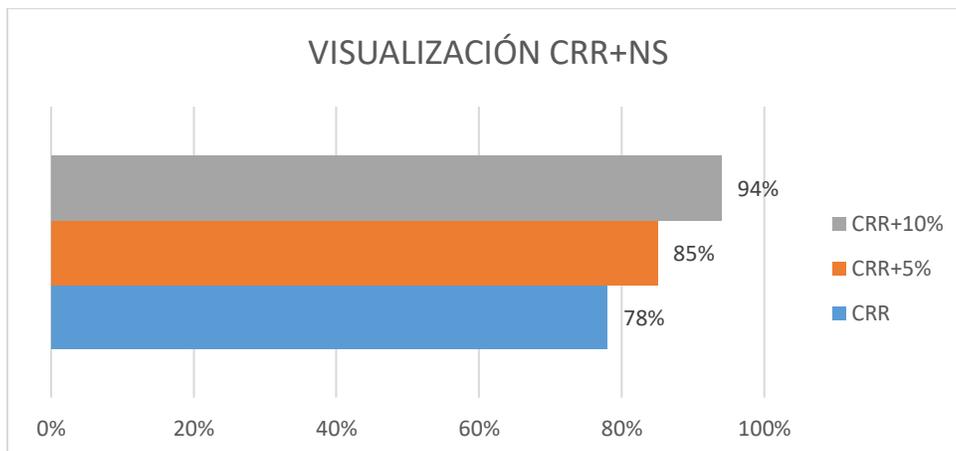
El pH de las emulsiones asfálticas es de 2.42 y el pH de la Nanosílíce es 10, de manera que, al modificar la emulsión asfáltica con la NS, aumenta el pH de esta, evidenciando así una variación del mismo desde 2,74 para las emulsiones CRR hasta un 3,0 para las emulsiones CRL modificadas en un determinado tiempo. Así pues, se puede concluir que, las emulsiones asfálticas a medida que se adiciona Nanosílíce, incrementa el pH dejando así de ser menos ácidas.

3. Ensayo de Adherencia en Bandeja

El objetivo de esta prueba es determinar el porcentaje de adherencia de la emulsión asfáltica con la nanosílice; para ello se tiene en cuenta la capacidad de recubrimiento de la emulsión, su estabilidad química y su acción de mezclado. En las gráficas 5 y 6, se presenta el porcentaje de adherencia de las emulsiones asfálticas sin modificar y modificadas con Nanosílice.



Gráfica 5. Porcentaje de Adherencia de CRL-1 y CRL + Nanosílice.



Gráfica 6. Porcentaje de Adherencia de CRR-1 y CRR + Nanosílice.

Al finalizar el ensayo, se pudo precisar que a mayor cantidad de nanosílice, mayor porcentaje de adherencia; lo anterior, debido a que más del 75% de la superficie de contacto de las partículas adheridas a la emulsión asfáltica quedaron cubiertas con el ligante, tal como lo referencia la norma INV E – 740 – 13 (Instituto Nacional de Vías - INVIAS, 2013).

4. Residuo por Evaporación de las Emulsiones Asfálticas

Esta prueba consiste en determinar cuantitativamente el residuo de las emulsiones asfálticas mediante la evaporación, es decir, que una muestra de emulsión sea sometida a evaporación por calentamiento directo tal como lo establece la norma INV E – 771 – 2013 (Instituto Nacional de Vías - INVIAS, 2013). En razón de tal procedimiento se puede evidenciar el residuo de cemento asfáltico de las emulsiones, esto es, la separación de la emulsión asfáltica del asfalto puro de manera que se arroje un porcentaje.

En ese orden de ideas, con el fin de obtener el porcentaje de asfalto residual de las emulsiones asfálticas se llevó a cabo tal ensayo respecto a las seis muestras anteriormente mencionadas, las cuales fueron introducidas a un horno con temperatura de 163°C. En la tabla 3, se presentan los resultados del Residuo por evaporación.

Tabla 3. Resultados del Residuo para las Emulsiones Asfálticas.

CRL-1	59.4%	CRR-1	62.2%
CRL+5%	58.6%	CRR+5%	60.4%
CRL+10%	56.5%	CRR+10%	57.2%

Según las especificaciones de la Tabla 411 – 1 donde se precisan las características de las emulsiones asfálticas catiónicas del Instituto Nacional de Vías se establece que el porcentaje de contenido de agua para las emulsiones CRL-1 es menor de 43% y respecto a las de asfalto residual es mayor al 57%; sobre las emulsiones CRR-1 se establece que el porcentaje de contenido de agua es menor al 40% y respecto a las de asfalto residual es mayor al 60%.

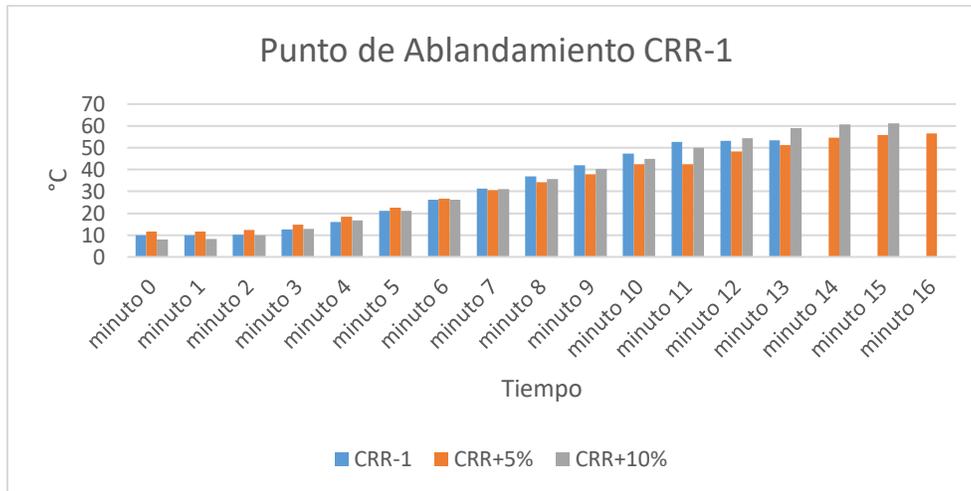
En virtud de lo anterior, se evidencia que la nanosílice al ser líquida va a interferir en el porcentaje de residuo de los cementos asfálticos, así, a mayor porcentaje de nanosílice a la muestra, menor será el porcentaje de residuo de los cementos asfálticos, de manera que se vea modificada la viscosidad de las mezclas asfálticas, pues a mayor porcentaje de nanosílice, mayor será la fluidez y mayor será su viscosidad.

Por consiguiente, el cemento asfáltico producido por los residuos de las emulsiones presentará un mayor resultado en las emulsiones de rotura rápida que en las de rotura lenta, en razón de que las de rotura rápida contienen un porcentaje de asfalto, mayor.

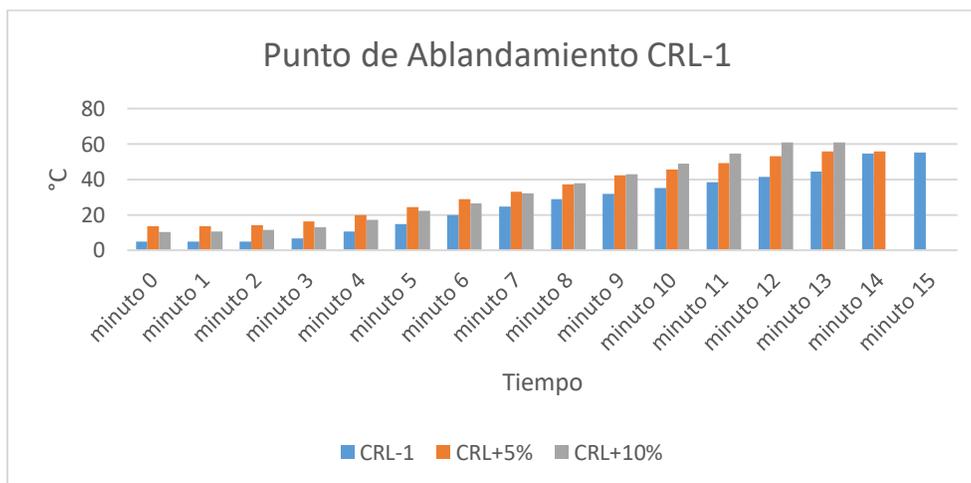
Correlativamente, se realiza el mismo procedimiento de Residuo por Evaporación Asfáltica para los ensayos de Punto de Ablandamiento y Determinación de Viscosidad del Asfalto, donde respecto a estos se obtuvieron diferencias en los residuos no mayores al 0.4% sobre cada emulsión ensayada.

5. Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos (Aparato de Anillo y Bola)

El punto de ablandamiento de las emulsiones asfálticas se determinó a partir del residuo por evaporación. Este ensayo, se convierte en fundamento, en virtud de la utilidad que tiene para la clasificación de los productos bituminosos y al ser indicador de cómo se comporta este material cuando es sometido a elevadas temperaturas para su vida útil. En la gráfica 7 y 8, se evidencia el comportamiento de los cementos asfálticos durante el ensayo.



Gráfica 7. Punto de Ablandamiento CRR-1.



Gráfica 8. Punto de Ablandamiento CRL-1.

Según las especificaciones de la Tabla 410 – 1 donde se precisan las características del cemento asfáltico del Instituto Nacional de Vías, se establece que el punto de ablandamiento de los cementos asfálticos está entre 45°C a 58°C: respecto a los cementos asfálticos de CRR-1 el punto de ablandamiento es de 53,3°C y respecto a los cementos asfálticos de CRL-1 el punto de ablandamiento es de 55,2°C.

En virtud de lo anterior, se evidencia que los cementos asfálticos modificados con la nanosílice presentan una mayor rigidez y consistencia, pues respecto a las muestras de CRL-1 hubo un aumento de 6.5°C, y respecto a las muestras de CRR-1 aumento 8.0°C, donde se presenta un mejor comportamiento con respecto a la adición de Nanosílice.

El aumento de nanosílice evidenció un cambio en la consistencia en ambos cementos asfálticos. Así mismo, se pudo determinar que el cemento asfáltico modificado con nanosílice presenta una disminución de resistencia a fluir.

6. Determinación de Viscosidad del Asfalto Empleando un Viscosímetro Rotacional

El objetivo de este ensayo radica en conocer el coeficiente de viscosidad entre el esfuerzo de corte aplicado y la tasa de corte, es decir, en valor a las propiedades de flujo. Así pues, se emplean los cementos asfálticos con adición de nanosílice, obtenidos en el porcentaje de asfalto residual de las emulsiones asfálticas y posteriormente fueron vertidas en cápsulas que tienen un peso de 9.88g. En la tabla 4, se presentan los datos de viscosidad en los cementos asfálticos.

Tabla 4. Datos Viscosímetro Rotacional.

MUESTR A	TEMPERATUR A °C	VELOCIDAD DE GIRO (RPM)	TORQU E %	VISCOSIDA D (CP)	VISCOSIDA D (MPA)
CRR-1	59.5	0.2	91.1	1139000.00	1139
CRR+5%		0.2	89.6	1120000.00	1120
CRR+10%		0.2	100	2500000.00	2500
CRL-1		0.2	99	1188000.00	1188
CRL+5%		0.2	83.1	1036000.00	1036
CRL+10%		0.2	99.6	1245000.00	1245

En virtud de lo anterior, se evidencia que la nanosílice vuelve los cementos asfálticos más viscosos, de manera que, las muestras sin modificación son menos viscosas que las modificadas, lo que genera mayor adherencia. Cabe concluir que un aumento en la temperatura la viscosidad tendría a aumentar mientras aumente el porcentaje de nanosílice.

7. Viscosidad Saybolt Furol de Emulsión Asfáltica

Este ensayo pretende cuantificar el estado de fluidez de la emulsión asfáltica a la temperatura de estudio, de forma que, con un viscosímetro tipo Saybolt se mide el tiempo en que la muestra de emulsión llena un matraz aforado de 60cm³ a una temperatura de 25°C (Instituto Nacional de Vías - INVIA, 2013), y en virtud, del tiempo se podrá determinar el tipo de rompimiento: rápido, medio o lento, que tiene la emulsión.

Así mismo, a partir de lo establecido por la norma INV E – 763 – 13 (Instituto Nacional de Vías - INVIAS, 2013) se establece que la emulsión asfáltica debe tener una mayor fluidez para ser aplicada uniformemente en forma de rocío y que a su vez sea suficientemente consistente para que no fluya por pendientes transversales.

A partir de los datos obtenidos en la tabla 5, se evidencia que la implementación de nanosílice a las emulsiones asfálticas produce que se genere mayor fluidez en la mezcla, en virtud del porcentaje de adición.

Tabla 5. Datos Viscosímetro Saybolt Furol.

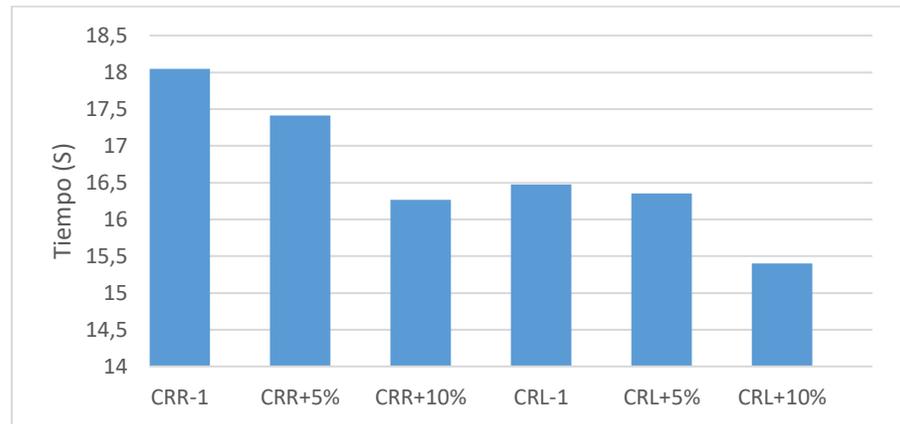
VISCOSIMETRO SAYBOLT E-763-13			PROMEDIO
CRR-1	Prueba 1 (S)	18.22	18.05
	Prueba 2 (S)	17.88	
CRR+5%	Prueba 1 (S)	17.2	17.415
	Prueba 2 (S)	17.63	
CRR+10%	Prueba 1 (S)	16.32	16.265
	Prueba 2 (S)	16.21	
CRL-1	Prueba 1 (S)	16.45	16.475
	Prueba 2 (S)	16.5	
CRL+5%	Prueba 1 (S)	16.4	16.35
	Prueba 2 (S)	16.3	
CRL+10%	Prueba 1 (S)	15	15.4
	Prueba 2 (S)	15.8	

En la tabla 6, se caracterizan las propiedades de las emulsiones sin modificar y modificadas con nanosílice para un peso aproximado de 50 gramos cada una. Las muestras CRL-1 presentan una mayor fluidez debido a que el porcentaje de agua es mayor, observando en estas emulsiones entre 0.4 a 1.45 gramos de nanosílice mientras que para las CRR-1 se presenta un 0.9 a 2.5 gramos de nanosílice, las cuales son más viscosas debido a su aumento de contenido asfáltico por adición de nanosílice lo que genera una menor fluidez de estas.

Tabla 6. Propiedades de las Emulsiones Asfálticas.

Muestra	Residuo	Agua	NS
CRL-1	59.40%	40.60%	0%
CRL+5%	58.60%	40.60%	1%
CRL+10%	56.50%	40.60%	3%
CRR-1	62.20%	37.80%	0%
CRR+5%	60.40%	37.80%	2%
CRR+10%	57.20%	37.80%	5%

De esta forma, se produce un cambio en las condiciones de las emulsiones, pues a mayor porcentaje de nanosílice, mayor va a ser su fluidez; cambia su viscosidad, tal como se evidencia en la gráfica 9 se detalla el promedio del tiempo para cada emulsión estudiada:



Gráfica 9. Viscosímetro Saybolt Furol.

El comportamiento de las emulsiones asfálticas modificadas con nanosílice, presentan una mayor fluidez, que las emulsiones convencionales. Se verifica que estas emulsiones asfálticas modificadas presentan una excelente viscosidad y adherencia.

8. Análisis Microestructural de las Emulsiones

El objetivo de este método radica en determinar la topografía mediante el rastreo de la muestra por una sonda o punta afilada de forma piramidal o cónica; donde tal sonda va acoplada a un listón o palanca microscópica muy flexible de sólo unos 200 μm , y se realiza a través de un Microscopio de Fuerza Atómica (AFM). De manera que, se analizaron las emulsiones asfálticas objeto de estudio tomando aproximadamente 1gr por cada muestra de asfalto, las cuales fueron dejadas a temperatura ambiente por 24 horas y posteriormente fueron trasladadas al equipo para sus debidos ensayos.

En las ilustraciones 1 hasta la 6 y las gráficas 10 hasta la 15, se presentan las topografías de las emulsiones asfálticas modificadas con nanosílice a través de la AFM.

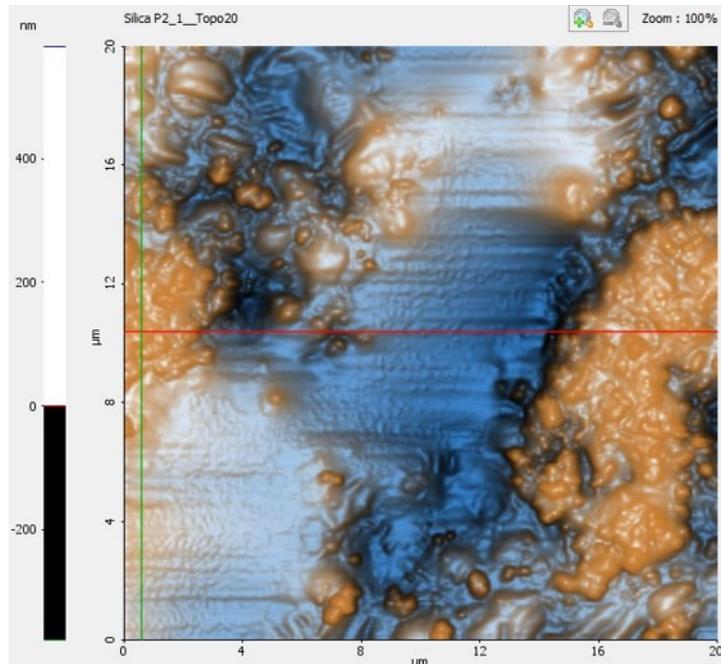
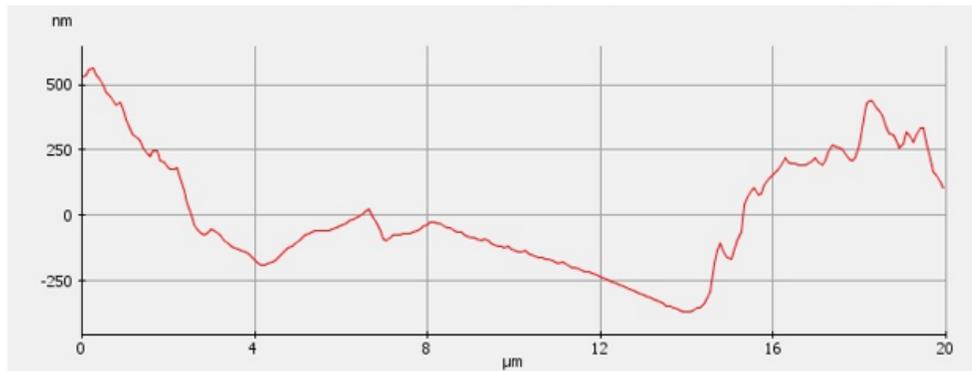


Ilustración 1. Microestructura de Emulsión Asfáltica con Agregado de Nanosílice, CRL-1, topográfica (20x20 μm.). Fuente propia.



Gráfica 10. Microscopio de Fuerza Atómica de Emulsión Asfáltica con Agregado de Nanosílice, CRL-1, Fuente propia.

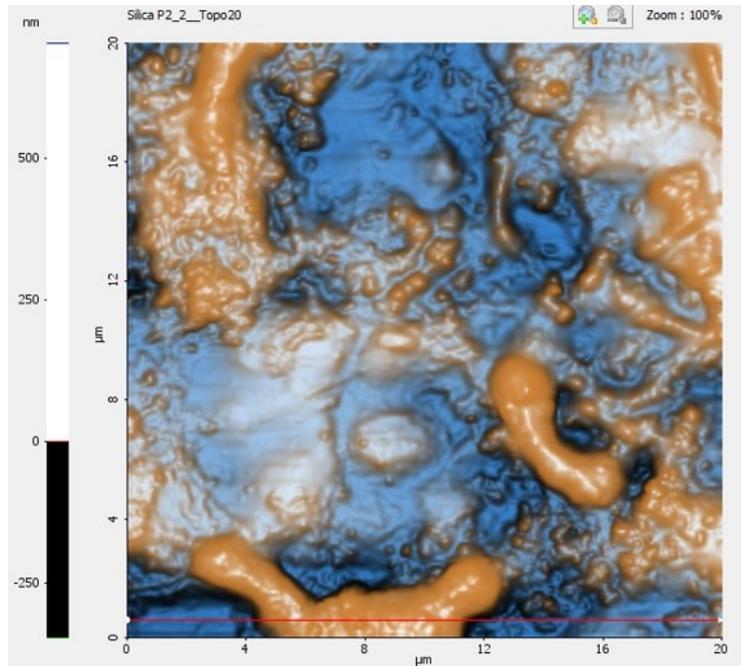
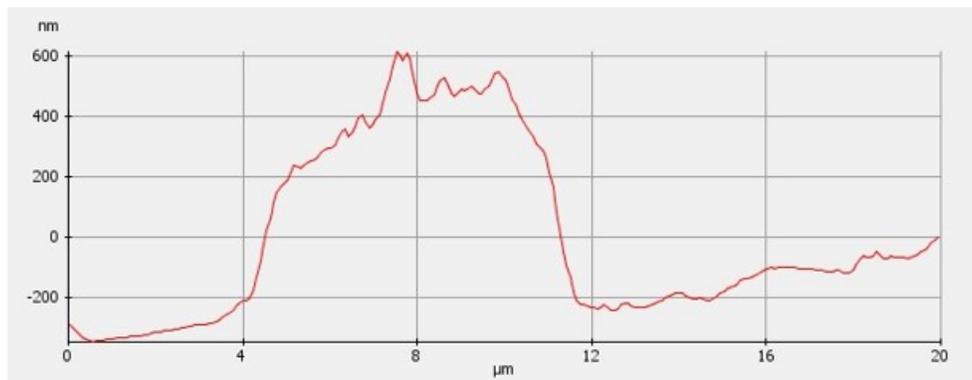


Ilustración 2. Microestructura de Emulsión Asfáltica con Agregado de Nanosílice, CRL+5%, topográfica (20x20 μm.). Fuente propia.



Gráfica 11. Microscopio de Fuerza Atómica de Emulsión Asfáltica con Agregado de Nanosílice, CRL+5%, Fuente propia.

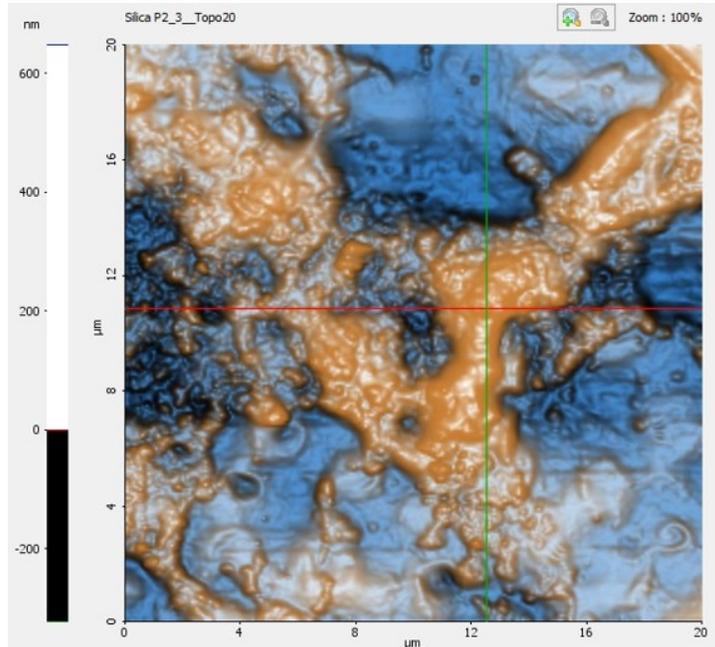
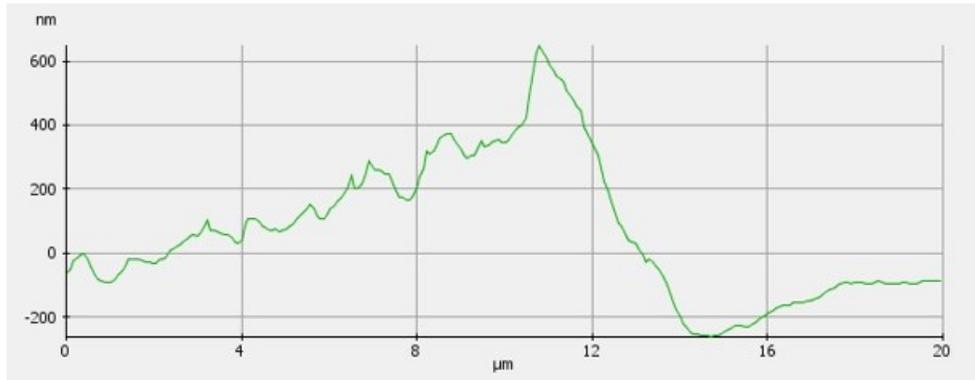


Ilustración 3. Microestructura de Emulsión Asfáltica con Agregado de Nanosílice, CRL+10%, topográfica (20x20 μm.). Fuente propia.



Gráfica 12. Microscopio de Fuerza Atómica de Emulsión Asfáltica con Agregado de Nanosílice, CRL+10%, Fuente propia.

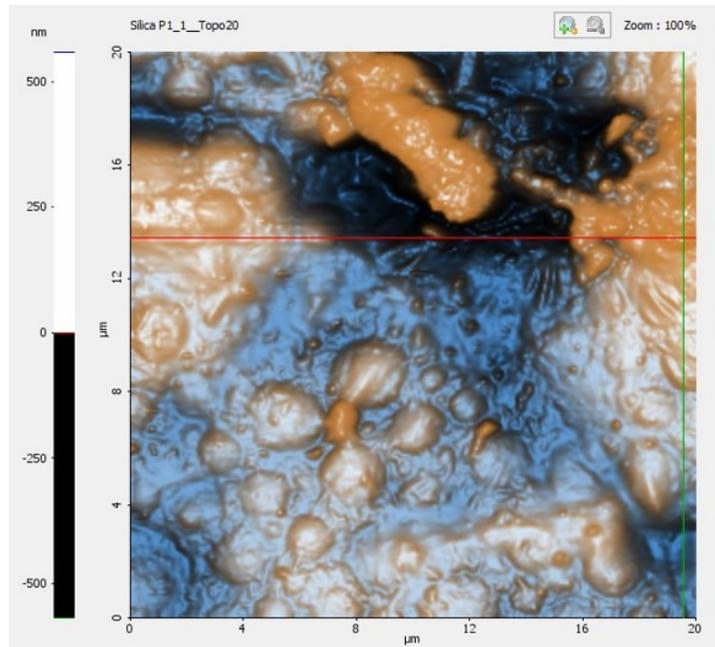
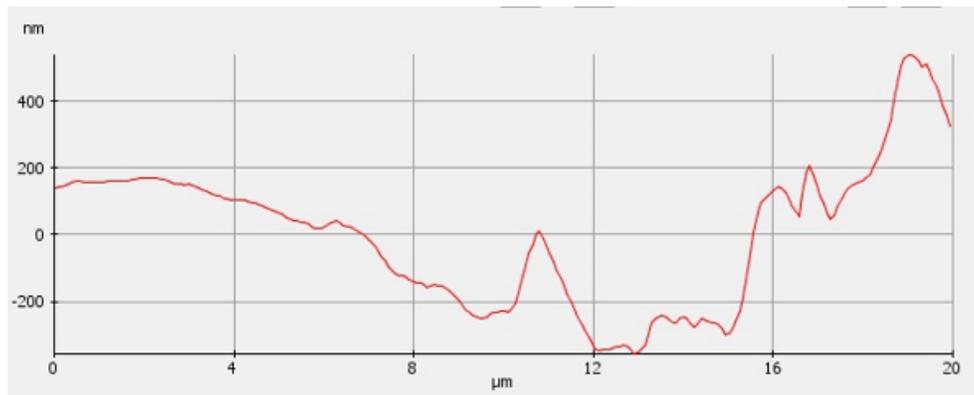


Ilustración 4. Microestructura de Emulsión Asfáltica con Agregado de Nanosílice, CRR-1, topográfica (20x20 μm.). Fuente propia.



Gráfica 13. Microscopio de Fuerza Atómica de Emulsión Asfáltica con Agregado de Nanosílice, CRR-1, Fuente propia.

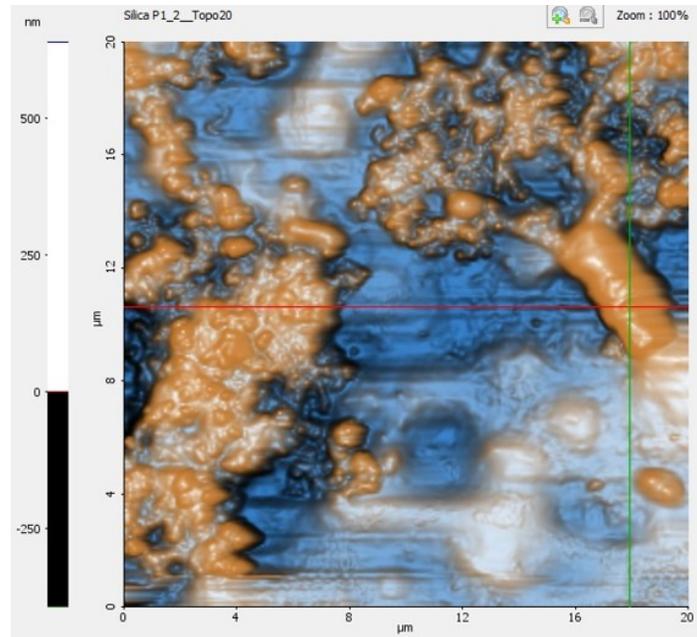
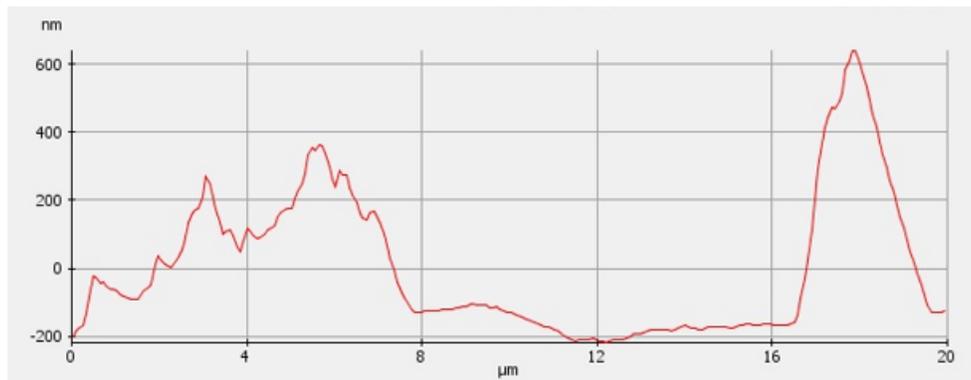


Ilustración 5. Microestructura de Emulsión Asfáltica con Agregado de Nanosílice, CRR+5%, topográfica (20x20 µm.). Fuente propia.



Gráfica 14. Microscopio de Fuerza Atómica de Emulsión Asfáltica con Agregado de Nanosílice, CRR+5%, Fuente propia.

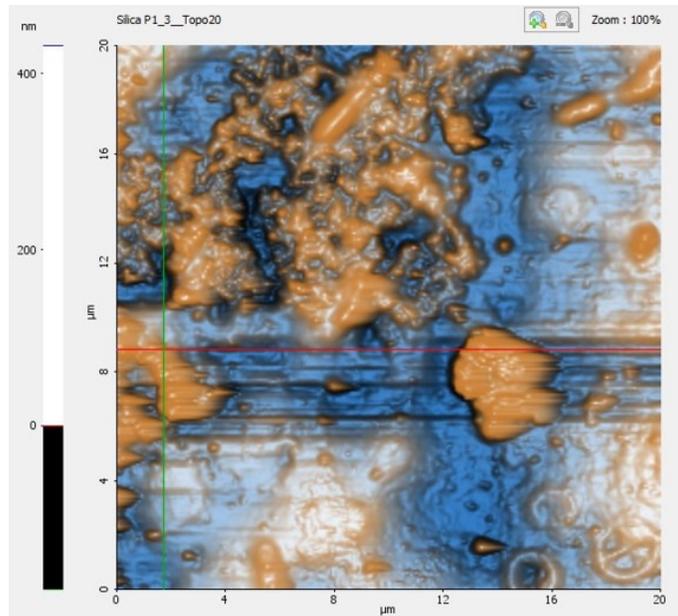
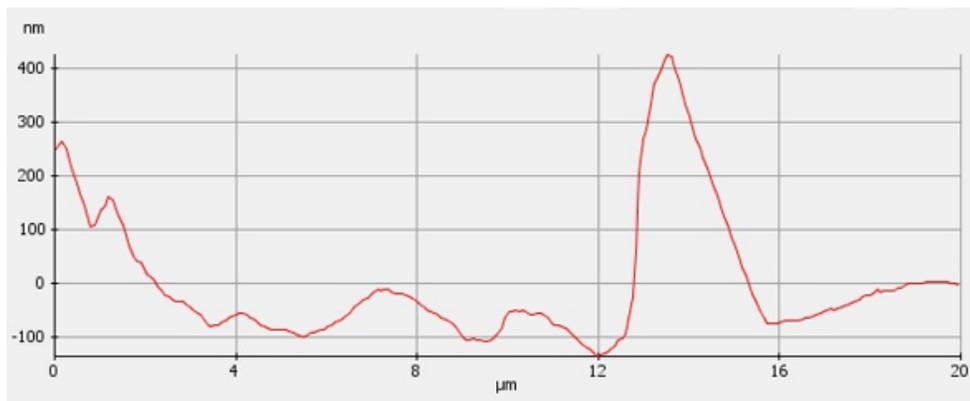


Ilustración 6. Microestructura de Emulsión Asfáltica con Agregado de Nanosílíce, CRR+10%, topográfica (20x20 μm.). Fuente propia.



Gráfica 15. Microscopio de Fuerza Atómica de Emulsión Asfáltica con Agregado de Nanosílíce, CRR+10%, Fuente propia.

La Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) permite observar un cambio en la forma y características de las emulsiones asfálticas modificadas con nanosílíce, de igual forma evidencia el tamaño de partícula, en nanómetros y micrómetros a través de la medición de la distribución del tamaño de estas.

En tal ensayo se pudo evidenciar que a medida que se agregaba nanosílíce fue cambiando la consistencia y viscosidad, el comportamiento entre las emulsiones en el AFM aumentaron, lo que hace notable que la emulsión asfáltica CRR-1 y CRR - 1, tuvieron cambios, pues los puntos de los picos aumentaron.

En la tabla 7, se evidencia que a mayor adición de nanosílice a las emulsiones asfálticas, estas tienden a aumentar la pendiente, evidenciadas en las gráficas 10 hasta la 15; lo anterior, en relación al tamaño de las partículas.

Tabla 7. Tamaño de Partículas de las Emulsiones Asfálticas.

Método Análisis Microestructural de las Emulsiones (AFM).						
Emulsión Asfáltica.	CRR-1	CRR+5%	CRR+10%	CRL-1	CRL+5%	CRL+10%
Tamaño de Partícula. (nm/ μm)	149.23	156.13	279.86	106.33	150.16	251.57

Las emulsiones asfálticas están compuestas por agua más contenido de asfalto; de esta manera, al adicionarse la nanosílice líquida, esta actúa como un tensoactivo agrupando las cargas positivas, por lo cual se incrementa el tamaño de las partículas, como se evidencia en la ilustración 7; mejorando las propiedades del rompimiento, consistencia y viscosidad de las emulsiones asfálticas.

Así mismo, las emulsiones asfálticas CRR-1 presentan un mayor incremento de las partículas debido a que estas presentan un mayor porcentaje de asfalto que las CRL-1.

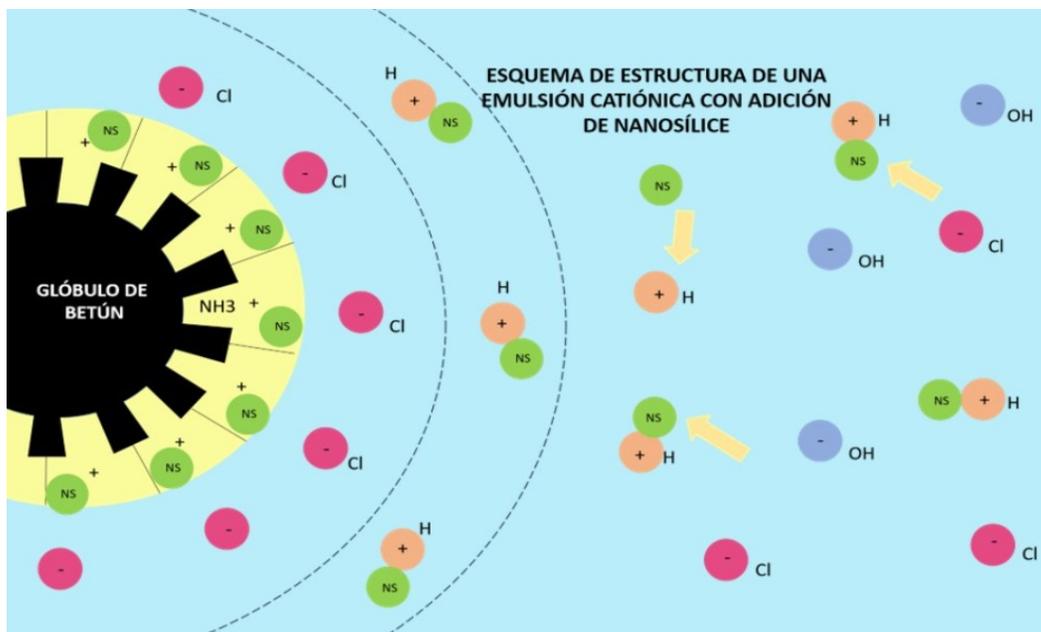


Ilustración 7. Esquema de Estructura de una Emulsión Catiónica. (Ferré Franquet, 2018) & Fuente Propia.

RESULTADOS

En la tabla 8, se resumen los datos obtenidos de los ensayos y métodos que se le realizaron a las emulsiones asfálticas sin modificar y modificadas con Nanosílice.

Tabla 8. Resultados de los Ensayos y Métodos a las Emulsiones Asfálticas Estudiadas.

ENSAYOS SOBRE LA EMULSION	NORMA DE ENSAYO INV	ROTURA RÁPIDA			ROTURA LENTA		
		CRR-1	CRR+5%	CRR+10	CRL-1	CRL+5%	CRL+10
Carga de Partícula.	E-767	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva
pH	E-768	2.39	2.38	2.74	2.43	2.80	3.0
Adherencia en Bandeja	E-740	Cubiertas > 75%	Cubiertas > 80%	Cubiertas > 90%	Cubiertas > 75%	Cubiertas > 80%	Cubiertas > 90%
Contenido de Asfalto Residual %	E-771	62.2	60.4	57.2	59.4	58.6	56.5
Punto de Ablandamiento, °C	E-712	53.3	56.5	61.2	55.2	55.9	61.0
Viscosidad Absoluta (60°C), MPA	E-717	1139	1120	2500	1188	1036	1245
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C, S	E-763	18.05	17.42	16.27	16.48	16.35	15.4
Método Análisis Microestructural de las Emulsiones (AFM).							
Tamaño de Partícula. (nm/µm)	-	149.23	156.13	279.86	106.33	150.16	251.57

CONCLUSIONES

Se evidencia que a mayor porcentaje de nanosílice adicionada a las emulsiones asfálticas estudiadas, mayor será su tiempo de rompimiento; mejorando su adherencia y permitiendo una buena distribución de los agregados pétreos.

Así mismo, las emulsiones asfálticas con adición de nanosílice aumentan el pH, de manera que, dejan de ser menos ácidas: se evidencia un incremento de 2.74pH para las emulsiones CRR-1 y hasta un 3.0pH para las emulsiones CRL-1 modificadas, estabilizándose a partir de las 12 horas.

En lo que respecta al ensayo de adherencia en bandeja se determinó que a mayor cantidad de nanosílice adicionada, el porcentaje de adherencia de la emulsión asfáltica incrementa, de forma que desde un 76% hasta 94% de la superficie de contacto está cubierta con el ligante; y evidenciándose que las emulsiones CRR-1 modificadas presentan un mejor comportamiento que las CRL-1.

Por otro lado, se demuestra que la nanosílice al ser líquida interfiere en el porcentaje de residuo de los cementos asfálticos, debido a que a mayor porcentaje de nanosílice adicionada a la muestra, menor era el porcentaje de residuo de los cementos asfálticos, de manera que, se modifica la viscosidad de las mezclas asfálticas, pues a mayor porcentaje de nanosílice, mayor será la fluidez y viscosidad. Así pues, las emulsiones CRR-1 modificadas presentan un mayor contenido de residuo debido a que estas tienen mayor porcentaje de asfalto, que las CRL-1.

En lo que respecta a los cementos asfálticos de las emulsiones modificadas con la nanosílice se evidencia una mayor rigidez y consistencia al tener un incremento de 6.5°C y 8.0°C en relación a las muestras de CRL-1 y CRR-1 respectivamente, donde se presenta un mejor comportamiento en las emulsiones CRR-1 respecto a la adición de nanosílice. Esto debido a que, la adición de nanosílice vuelve los cementos asfálticos más viscosos, lo que genera mayor adherencia: pues a un aumento en la temperatura, la viscosidad tendría que aumentar correlativamente al porcentaje de nanosílice.

Las muestras CRL-1 sin modificar y modificadas presentan una mayor fluidez respecto a las CRR-1, esto se genera en virtud, de que las emulsiones son más viscosas debido a su aumento de contenido asfáltico por adición de nanosílice lo que genera una menor fluidez de estas.

La adición de nanosílice a las emulsiones asfálticas mejora las características de rompimiento, viscosidad, adherencia, rigidez y consistencia, ya que actúa como un tensoactivo agrupando las cargas positivas.

REFERENCIAS

- Dávila, M., Da Costa, D., & Duarte, D. (2013). Efectos de la Adición de Nanosilice en Cementos y Concretos. *Efectos de la Adición de Nanosilice en Cementos y Concretos*. Colombia.
- Ferré Franquet, P. (2018). Emulsiones de Betún su Química y su Física. *Emulsiones de Betún su Química y su Física*.
- Gómez Huanca, C. F. (2017). Uso y Aplicación de Emulsiones Asfálticas. *Uso y Aplicación de Emulsiones Asfálticas*. Perú.
- Instituto Nacional de Vías - INVIAS. (2013). Invias INV E - 712 - 13. *Invias INV E - 712 - 13*. Colombia.
- Instituto Nacional de Vías - INVIAS. (2013). Invias INV E - 717 - 2013. *Invias INV E - 717 - 2013*.
- Instituto Nacional de Vías - INVIAS. (2013). Invias INV E - 740 - 13. *Invias INV E - 740 - 13*. Colombia.
- Instituto Nacional de Vías - INVIAS. (2013). Invias INV E - 763 - 13. *Invias INV E - 763 - 13*. Colombia.
- Instituto Nacional de Vías - INVIAS. (2013). Invias INV E - 771 - 13. *Invias INV E - 771 - 13*.
- Instituto Nacional de Vías - INVIAS. (2013). Invias INV E - 771 - 13. *Invias INV E - 771 - 13*. Colombia.
- Instituto Nacional de Vías - INVIAS. (2013). Invias INV E -767 - 13. *Invias INV E -767 - 13*.
- Loaiza Osorio, L. I., Díaz Gonzalez, E. T., & Rojas Manzano, M. A. (2019). Nanosilice como aditivo para el concreto - Caso Colombia. *Nanosilice como aditivo para el concreto - Caso Colombia*. Colombia.
- Majewski, P. (2018). Studying Engineering Characteristics of Asphalt Binder and Mixture Modified by Nanosilica and Estimating Their Correlations. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-10.
- Mendoza Giraldo, H. D. (2016). Diagnóstico del Empleo Tratamientos Superficiales con Emulsión Asfáltica en Obras de Infraestructura Vial en Colombia. *Diagnóstico del Empleo Tratamientos Superficiales con Emulsión Asfáltica en Obras de Infraestructura Vial en Colombia*. Colombia.
- Morea, F., & Pique, T. M. (s.f.). Evaluación de un Asfalto Comercial con la Adición de Nanosilica y Analisis del Desempeño en una Mezcla Asfáltica. *Evaluación de un Asfalto Comercial con la Adición de Nanosilica y Analisis del Desempeño en una Mezcla Asfáltica*. Argentina .
- Moshtagh, N., Zafari, F., Rahi, M., & Nazockdast, H. (2014). Using SEPS as A Novel Modifier for Bitumen. *Study of Civil Engineering and Architecture*, 70-77.
- Muñiz, Á. G. (Mayo de 2022). *Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas*. Obtenido de Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas: <https://ateb.es/index.php/blog/item/489-mecanismo-de-rompimiento-de-una-emulsion-asfaltica-bituminosa>

Santos Vizarrata, D. K., & Estrada Gutierrez, C. E. (2021). Análisis Comparativo de las Propiedades Físico-Mecánicas de una Mezcla Asfáltica Modificada con Nanosílice Respecto a una Mezcla Asfáltica Betutec PG 70-28. *Análisis Comparativo de las Propiedades Físico-Mecánicas de una Mezcla Asfáltica Modificada con Nanosílice Respecto a una Mezcla Asfáltica Betutec PG 70-28*. Perú.

Tsotsis, G. (2018). Aplicaciones de la Nanotecnología en los Materiales de Construcción. *Aplicaciones de la Nanotecnología en los Materiales de Construcción*. Barcelona.

Zafari, F., Rahi, M., Moshtagh, N., & Nazockdast, H. (2014). The Improvement of Bitumen Properties by Adding NanoSilica. *Study of Civil Engineering and Architecture*, 62-69.