

Formulación y caracterización de emulsiones asfálticas nanomodificadas

Luis Fernando Gonzalez Medina

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Modalidad trabajo de investigación

Directora

Yuly Fernanda López Contreras

Ingeniera Química, Ph.D.

Co directora

Yenny Patricia Ostos Rodríguez

Ingeniera Química

Universidad Industrial de Santander

Faculta de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Ingeniería Química

Bucaramanga, Colombia

2025

Contenido

Introducción	10
1. Objetivos	11
1.1 Objetivo general	11
1.2 Objetivos específicos	11
2. Marco conceptual.....	11
2.1 Asfalto	11
2.1.1 Asfáltenos.....	12
2.1.2 Máltenos.....	12
2.1.3 Saturados	12
2.1.4 Aromáticos.....	13
2.1.5 Resinas	13
2.2 Envejecimiento	13
2.3 Reología.....	13
2.4 Mezclas asfálticas	14
2.5 Materiales marginales	14
2.6 Emulsiones asfálticas	15
2.7 Clasificación emulsiones.....	15
2.8 Surfactantes	16

2.9 Clasificación surfactantes.....	17
2.9.1 Aniónicos.....	17
2.9.2 Catiónicos.....	17
2.10 Proceso	18
2.11 Emulsiones modificadas	20
3. Estado del arte.....	22
4. Metodología	25
4.1 Etapa 1: Selección de modificador a emplear en la formulación de NME	25
4.2 Etapa 2: Formulación de emulsiones asfálticas nanomodificadas	27
4.3 Etapa 3: Caracterización de emulsión asfáltica modificada con nanosilanos	28
5. Resultados.....	29
5.1 Selección y caracterización de componentes	29
5.1.1 Selección del agente modificador y caracterización de base asfáltica.....	29
5.1.1.1 Parámetros técnicos para la formulación de emulsiones.	30
5.1.2 Caracterización fisicoquímica fase oleosa	31
5.1.3 Propiedades reológicas	33
5.1.4 Caracterización mineralógica del agregado pétreo	35
5.2 Formulación de emulsiones asfálticas nanomodificadas	35
5.2.1 Condiciones de formulación.....	40
5.3 Caracterización de emulsión asfáltica modificada con nanosilanos.....	42

5.3.1 Caracterización emulsiones catiónicas modificadas con diferente modificador	42
5.3.1.1 Propiedades reológicas	43
5.3.2 Caracterización de emulsiones aniónicas modificadas con NanoTac	45
6. Conclusiones	52
Referencias bibliográficas	54
Apéndices.....	68

Lista de tablas

Tabla 1 Pruebas de caracterización fisicoquímica y reológica al ligante original	26
Tabla 2 Formulación de emulsiones asfálticas nanomodificadas	27
Tabla 3 Características generales del surfactante utilizado	28
Tabla 4 Ensayos de caracterización para emulsiones asfálticas	29
Tabla 5 Propiedades fisicoquímicas de los modificadores utilizados	30
Tabla 6 Resultados caracterización material ligante original	32
Tabla 7 Propiedades reológicas ligante original	34
Tabla 8 Resultados ensayo MSCR para asfalto original.....	34
Tabla 9 Formulación de emulsiones asfálticas	36
Tabla 10 Caracterización de emulsiones catiónicas.....	42
Tabla 11 Propiedades reológicas ligante residual de emulsiones catiónicas nanomodificadas	44
Tabla 12 Caracterización fisicoquímica de emulsiones aniónicas nanomodificadas.....	46
Tabla 13 Resultados ensayo MSCR para ligantes de emulsiones aniónicas.....	50

Lista de figuras

Figura 1 Clasificación de emulsiones según dispersión	15
Figura 2 Clasificación de emulsiones según carga eléctrica.....	16
Figura 3 Etapas metodológicas para la formulación y caracterización de emulsiones asfálticas nanomodificadas	25
Figura 4 Caracterización química material granular.....	35
Figura 5 Emulsiones asfálticas con dificultad de homogenización	37
Figura 6 Emulsiones asfálticas fabricadas	38
Figura 7 Modificación antes de la emulsificación	39
Figura 8 Prueba de la gota para emulsiones	40
Figura 9 Resultados ensayo MSCR ligante residual de emulsiones catiónicas	44
Figura 10 Resultados ensayo MSCR ligante residual envejecido de emulsiones catiónicas.....	45
Figura 11 Emulsiones aniónicas nanomodificadas	47
Figura 12 Imagen microscópica de emulsión nanomodificada	47
Figura 13 Propiedades reológicas ligante residual de emulsión aniónica con 0,5% de surfactante	49
Figura 14 Propiedades reológicas ligante residual de emulsión aniónica con 1% de surfactante	50

Lista de apéndices

Apéndice A Porcentaje de recuperación para ligantes residuales envejecidos a tensiones de 0,1 KPa.....	68
Apéndice B Valor de fluencia no recuperable para ligantes residuales envejecidos a tensiones de 0,1 KPa.....	68
Apéndice C Propiedades reológicas de ligante residual con 0,5% surfactante.....	69
Apéndice D Propiedades reológicas de ligante residual con 1 % de surfactante.....	69
Apéndice E Porcentaje de recuperación para ligantes residuales envejecidos a tensiones de 3,2 KPa.....	70
Apéndice F Valor de fluencia no recuperable para ligantes residuales envejecidos a tensiones de 3,2 KPa.....	70

Resumen

Título: Formulación y caracterización de emulsiones asfálticas nanomodificadas*

Autor: Luis Fernando González Medina**

Palabras clave: Materiales marginales, pavimentos flexibles, estabilidad, propiedades reológicas

Descripción:

Las vías de comunicación son fundamentales para el desarrollo socioeconómico de cualquier región. En este contexto, resulta prioritario mejorar la infraestructura vial, especialmente en las zonas rurales, mediante tecnologías que permitan soluciones sostenibles y de bajo costo. Esta investigación tuvo como objetivo formular y caracterizar emulsiones asfálticas modificadas con nanopartículas de silanos organofuncionales, en aras de mejorar las propiedades del ligante residual en mezclas asfálticas aplicables a vías terciarias.

Se llevó a cabo la formulación de emulsiones aniónicas con adición de nanosilanos, considerando variables como concentración de surfactante, relación asfalto/agua y proporción del agente modificador. Las emulsiones fueron evaluadas mediante ensayos fisicoquímicos y reológicos, siguiendo los lineamientos de la normativa INVIAS.

Los resultados evidenciaron que la incorporación de nanosilanos mejora significativamente la estabilidad térmica, las propiedades elásticas y la resistencia a la deformación del ligante residual. Asimismo, se observó una influencia notable en la estabilidad de la emulsión, atribuida a la interacción del nanomaterial con las moléculas asfálticas y el sistema tensioactivo. Estos hallazgos respaldan el uso de nanopartículas como alternativa viable para el mejoramiento de las mezclas asfálticas en condiciones de baja infraestructura técnica.

* Trabajo de investigación

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Ingeniería Química. Directora: Yuly Fernanda López Contreras. Ingeniera Química. Ph D. Codirectora: Yenny Patricia Ostos Rodríguez. Ingeniera Química

Abstract

Title: Formulation and characterization of nanomodified asphalt emulsions*

Author: Luis Fernando González Medina**

Key words: Marginal materials, flexible pavements, stability, rheological properties

Description:

Roads are essential for the socioeconomic development of any region. In this context, it is a priority to improve road infrastructure, especially in rural areas, through technologies that allow sustainable and low-cost solutions. The objective of this research was to formulate and characterize asphalt emulsions modified with silica nanoparticles in order to improve the properties of the residual binder in asphalt mixtures applicable to tertiary roads.

The formulation of anionic emulsions with the addition of nanosilanes was carried out, considering variables such as surfactant concentration, asphalt/water ratio and proportion of the modifying agent. The emulsions were evaluated by means of physicochemical and rheological tests, following the guidelines of INVIAS regulations.

The results showed that the incorporation of nanosilanes significantly improved the thermal stability, elastic properties and resistance to deformation of the residual binder. Likewise, a notable influence on emulsion stability was observed, attributed to the interaction of the nanomaterial with the asphaltic molecules and the surfactant system. These findings support the use of nanoparticles as a viable alternative for the improvement of asphalt mixtures under conditions of low technical infrastructure.

* Research work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering Chemical Engineer. Director: Yuly Fernanda López Contreras. Chemical Engineer, PhD. Codirector: Yenny Patricia Ostos Rodriguez

Introducción

La Organización de Naciones Unidas (ONU) destaca los objetivos fundamentales de desarrollo sostenible para proteger y fortalecer la calidad de vida y el desarrollo colectivo (Organización de las Naciones Unidas, n.d.). En este sentido las vías terciarias juegan un rol crucial en el impulso de la conectividad entre diferentes regiones, ya que satisface la creciente demanda de alimentos, energía, salud, servicios públicos y sobre todo transporte.

Las vías terciarias en el territorio colombiano, con bajo volumen de tránsito y sin tratamiento alguno o en mal estado, resulta crucial la búsqueda de soluciones eficientes, competitivas y económicamente asequibles para fortalecer los vínculos de conectividad entre las zonas rurales y urbanas (Pérez, 2020), y en donde las emulsiones asfálticas desempeñen un papel significativo en la búsqueda de estas, ya que su aplicación ahorra energía, reduce costos económicos y de tiempo, además de ser amigable con el medio ambiente (G. J. Jordaan & Steyn, 2022). Sin embargo, para desarrollar tratamientos efectivos junto con las emulsiones se requieren materiales pétreos que ayuden a mejorar las propiedades de resistencia mecánica de la estructura, lo que conlleva a altos costos operativos, especialmente en zonas remotas.

Ante esta situación, el presente estudio propone el uso de emulsiones asfálticas modificadas con nanopartículas de organosilanos como una tecnología innovadora para la mejora de mezclas aplicadas en pavimentos flexibles, donde se analiza el efecto del agente modificador sobre las propiedades fisicoquímicas y reológicas del ligante, con el fin de establecer formulaciones más estables, duraderas y compatibles con materiales locales de menor calidad, contribuyendo así a la optimización de la infraestructura vial en contextos rurales (G. J. Jordaan & Steyn, 2021c).

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Formular y caracterizar emulsiones asfálticas modificadas con nanosilanos

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el asfalto a emplear para la formulación de la emulsión modificada
- Establecer una metodología eficiente para la formulación de emulsiones modificadas con nanosilanos estables.
- Evaluar el efecto de los silanos organofuncionales sobre las propiedades fisicoquímicas y reológicas de la emulsión asfáltica nanomodificada

2. Marco conceptual

2.1 Asfalto

El asfalto o betún es un representante ideal de los ligantes hidrocarbonados o bituminosos siendo un compuesto orgánico o mezcla compleja hidrocarbonada principalmente de grupos alifáticos y nafténicos, elementalmente constituidas por cadenas de átomos predominantemente de hidrógeno y carbono con pequeñas cantidades de heteroátomos de azufre, nitrógeno y oxígeno generalmente. Su composición, estructura y demás propiedades químicas y físicas dependerán exclusivamente de su procedencia y tratamiento del crudo (Petersen, 2000).

Anteriormente solo se recuperaba de fuentes naturales y a principios del siglo XX se empezó a obtener esencialmente de la refinación del petróleo (Read & Whiteoak, 2003). En la actualidad, más del 90% de la producción de asfalto mundial se utiliza en la industria de la pavimentación, donde actúa como aglutinante de los agregados minerales para formar mezclas asfálticas (Lesueur, 2009). Desde el punto de vista estructural, el asfalto es considerado como una

sustancia coloidal compuesta de varias fracciones (Mercado et al., 2008), debido a su complejidad y gran variedad es improbable conocer su composición química exacta, sin embargo, se utiliza una técnica llamada análisis SARA la cual agrupa sus componentes en fracciones de Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos, los tres primeros agrupados en una fracción llamada máltenos (Wen et al., 1978).

2.1.1 Asfáltenos

Son sustancias sólidas aglomeradas, poliaromáticas y policíclicas. Es la fracción más pesada y la fase dispersa del asfalto. Una gran parte de los anillos aromáticos están conectados con la estructura intermolecular que le confiere una forma plana, también estos le confieren una gran polaridad al igual que por los grupos funcionales y partes apolares constituidas por cadenas alifáticas, lo que permite tener una dualidad polar-apolar dándole propiedades interfaciales. Los asfáltenos son responsables de dureza del material y de la correcta adhesión con los agregados (Alayon, 2004)

2.1.2 Máltenos

Son los constituyentes que mayormente predominan en la composición del asfalto, solubles en hidrocarburos saturados. Es la fracción más liviana y la fase continua del modelo coloidal. Responsables del comportamiento viscoso del material. Se dividen en saturados, aromáticos y resinas. (Pablo Aguiar Moya et al., 2018).

2.1.3 Saturados

Líquidos viscosos apolares, compuestos principalmente por cadenas ramificadas alifáticas y nafténicas con una masa molecular baja los cual los hace mucho más ligeros que los asfáltenos (Li & Greenfield, 2014).

2.1.4 Aromáticos

Aceites viscosos apolares, descritos como cadenas alifáticas con anillos aromáticos ligeramente condensados. Son un poco más viscosos que los saturados y junto con las resinas son los componentes más abundantes, y son de bajo peso molecular (Lesueur, 2009; Lira-Galeana & Hammami, 2000)

2.1.5 Resinas

Son sólidos o semisólidos polares con masa molecular alta pero más baja que los asfáltenos, su estructura es parecida a los asfáltenos con estructuras aromáticas más bajas, cadenas alifáticas largas, número y longitud de grupos alquilo, es una fracción importante debido a que actúa como agente peptizante permitiendo la estabilidad del sistema previniendo la aglomeración de asfáltenos (Adams, 2014; Mercado et al., 2008).

2.2 Envejecimiento

Es un proceso por el cual atraviesa el material que consiste en la pérdida de los componentes más volátiles y/o una fase de oxidación de sus componentes que configuran su estructura y propiedades fisicoquímicas. Esto, en particular, ofrece un aumento en la rigidez y viscosidad del asfalto, y se caracteriza por ser un proceso irreversible (Miró et al., 2015)

2.3 Reología

Se emplea para evaluar y describir la deformación y el comportamiento del flujo de los materiales a determinados esfuerzos de carga y temperaturas, donde la reometría es la ciencia encargada de estudiar estos datos reológicos (Mezger, 2018). Se emplea un reómetro de corte dinámico o por sus siglas en inglés (DSR) con el fin de medir el módulo complejo de corte G^* y el ángulo de fase θ los cuales indican la resistencia total y el comportamiento viscoso o elástico del material, aplicando una carga sinusoidal para analizar la respuesta del ligante a factores de

ahuellamiento (Arenas, 2006). Además, una mejora de este ensayo mide la respuesta elástica del material, denominado recuperación elástica a diferentes esfuerzos o sus siglas en inglés (MSCR) que mide el porcentaje de recuperación y la deformación cortante no recuperable (J_{nr}) permitiendo medir la susceptibilidad a la formación de surcos indicador de una deformación permanente. Las mediciones hechas dependen totalmente de la memoria elástica del material (Saboo & Kumar, 2015; Sandoval & Cremades, n.d.)

2.4 Mezclas asfálticas

Formadas por la mezcla de asfalto y agregados pétreos, en ocasiones se emplean aditivos para mejorar su rendimiento, comúnmente utilizada para construir y mantener autopistas, vías urbanas y caminos. Un tipo de clasificación es su temperatura de producción, existen 3 tipos. Las mezclas asfálticas en caliente se dan por calentamiento, en un rango de 150°C a 170°C. La mezcla tibia maneja un rango de temperatura inferior, entre 20°C y 40°C (Thives & Ghisi, 2017). Finalmente, las mezclas asfálticas en frío en donde no existe ningún tipo de calentamiento y es únicamente factible gracias a la implementación de emulsiones, cuyo objetivo principal es reducir la viscosidad del betún mediante una dilución para posteriormente realizar su tiempo de curado y obtener el ligante original (Mercado et al., 2008)

2.5 Materiales marginales

Son materiales granulares naturalmente disponibles en regiones específicas también conocidos como materiales “no estándares” o “inadecuados” que contienen un alto potencial de minerales primarios y secundarios, estos normalmente no cumplen con los criterios aplicados para el uso en carpetas asfálticas (G. J. Jordaan & Steyn, 2022)

2.6 Emulsiones asfálticas

Una emulsión asfáltica es la mezcla homogénea de dos líquidos que inicialmente, son inmiscibles, siendo un sistema termodinámico inestable que se compone de tres elementos básicos como son asfalto, agua y un surfactante, estos dos últimos catalogados como fase acuosa, en algunos casos esta mezcla contiene aditivos que mejoran su desempeño. La formación de la emulsión se da debido a la dispersión de un líquido, denominado fase dispersa, dentro de otro llamado fase continua, lo cual es posible gracias al agente tensioactivo que evita la coalescencia del ligante y reduce la tensión interfacial entre el asfalto y el agua (AEMA & Asphalt Institute, 2008; Arenas, 2006). Su propósito es obtener un ligante con baja viscosidad para ser útil a temperaturas ambiente.

2.7 Clasificación emulsiones

Las emulsiones se clasifican de acuerdo a sus fases, cuando se dispersa el betún en forma de gotas inmersas en una fase continua, se da una emulsión directa denominada O/W o gotas de betún (oil) dispersas en agua (water). Aquellas que contienen gotas de agua disueltas en aceite se llaman emulsiones inversas o emulsiones W/O. También se da lugar a emulsiones múltiples en donde la fase dispersa es una emulsión creando emulsiones tipo W/O/W o en caso contrario O/W/O (Tolosa, 2016), en la figura 1 se ilustra esta clasificación.

Figura 1

Clasificación de emulsiones según dispersión

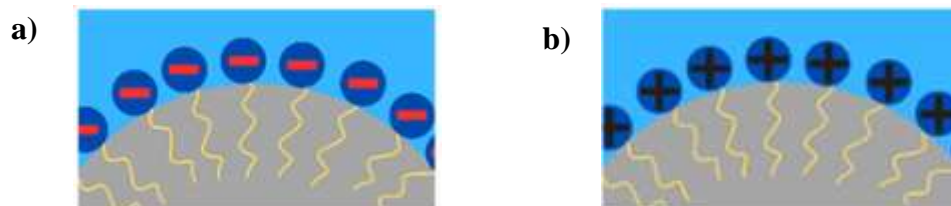


Nota. Emulsiones asfálticas a) inversas tipo W/O, b) emulsiones directas tipo O/W.

Otra agrupación se da según el momento en que se manifiesta la coalescencia o la rapidez con que el agua se separa del aceite, esta división se da por dos variantes, primero debido a la desestabilización fisicoquímica del sistema y segundo al entrar en contacto con los agregados, cuanto más finos sean los agregados, mayor será la velocidad de separación, teniendo tres tiempos de separación, lento, medio y rápido. Adicional, una clasificación importante es la carga eléctrica que exhiben las emulsiones, otorgada por el surfactante empleado (ver figura 2), las emulsiones con polaridad negativa generalmente son ácidas y más compatibles a los agregados de origen calizo, las de polaridad positiva son alcalinas y afines a los agregados de origen silíceo o cuarzoso (Arenas, 2006; Querol, 2018).

Figura 2

Clasificación de emulsiones según carga eléctrica



Nota. Emulsiones asfálticas a) negativas, b) positivas.

2.8 Surfactantes

Los agentes surfactantes, emulgentes o tensioactivos son sustancias químicas de naturaleza anfifílica, su estructura se compone de una parte polar o hidrofílica y otra apolar o lipofílica y su representación habitual también se aprecia en la figura 2, donde la cabeza representa la parte polar y la cola la apolar. Su propiedad de dualidad polar le permite adsorberse en la interfase entre el asfalto y el agua, lo cual permite la disminución de la tensión interfacial, además de tener agentes libres presentes en el agua que crean micelas, y el cual confiere la polaridad a la emulsión es por esto por lo que es el componente principal de la emulsión asfáltica (Tolosa, 2016). Existe un

sistema que calcula la afinidad del surfactante al aceite o al agua, nombrado balance hidrofílico-lipofílico conocido como HLB (Gómez, 2014). Habitualmente su elaboración se realiza de manera insoluble en agua haciendo necesaria una neutralización con una solución alcalina o acida para dar lugar a su solubilidad en agua y generar la fase acuosa (Salomon, 2006).

2.9 Clasificación surfactantes

Los emulgentes otorgan una capa eléctrica alrededor de las gotas dispersas que evitan su floculación, encontrándose una clasificación de la emulsión, así como del surfactante. Existen surfactantes aniónicos, catiónicos, no- iónicos y anfóteros. Los no-iónicos se caracterizan por no producir iones y los anfóteros por presentar dos grupos funcionales, tanto iónico como catiónico (Mercado et al., 2008)

2.9.1 Aniónicos

Se identifican por tener la parte polar con una carga negativa, al disociarse en el agua forman un anión anfífilo y un catión metálico o amonio cuaternario, lo más utilizados son aquellos que contiene grupos nafténicos de sodio y suelen ser sales sódicas, ácidos grasos o ácidos orgánicos, entre otros (Salager, 2002) . Su neutralización se realiza frecuentemente con una solución de hidróxido de sodio. Entre estos se encuentran los detergentes sintéticos tales como los alquil benceno sulfonatos, dando lugar al alquil bencenosulfónico lineal que es una sustancia química con alta eficiencia además de ser biodegradable y cuenta con una buena contribución a la tecnología de asfaltos (Anachkov et al., 2015; Özdemir, 2021, 2023).

2.9.2 Catiónicos

Característicos por su gran costo de producción y sus propiedades particulares, su disociación en agua se da en un catión orgánico anfífilo y un anión comúnmente de tipo

halogenuro, su parte polar está cargada positivamente y su neutralización se da habitualmente por una solución de ácido clorhídrico (Salager, 2002).

2.10 Proceso

La emulsificación consta de diversos métodos que se engloban en dos grandes grupos, mecanismos de alta energía que emplean fuerza mecánica y métodos de baja energía los cuales implican procesos fisicoquímicos, la energía es fundamental a raíz de su inestabilidad termodinámica (Lendínez, 2015). La técnica de alta energía comúnmente utilizada y se basa en proporcionar la energía necesaria para poder dispersar el asfalto en gotas e irlas deformando y haciendo más pequeñas, esto mediante un molino coloidal cuyo principio se basa en la acción de un rotor contra un estator fijo, que brinda el trabajo hidráulico, corte y rozamiento a la que se somete la solución, al igual que otros agitadores o mezcladores (Rendón & Torres, 2018).

Para fabricar una emulsión es necesario que la fase acuosa mantenga un rango de temperatura que favorezca la activación del emulgente sin que el agua se evaporare. Al igual que el agua, la fase oleosa deberá presentar una baja viscosidad para garantizar una óptima dispersión lo cual es factible gracias a un aumento de su temperatura y dadas estas condiciones se lleva a cabo la adición secuencial de una fase en otra junto con agitación mecánica hasta lograr obtener una mezcla completamente homogénea (Andrea & Calderón, 2012; Gutiérrez et al., 2002).

Al ser un sistema termodinámicamente inestable en algún momento volverá a su estado inicial, el cual tendrá las dos fases separadas debido a su diferencia de densidad, la estabilidad es la capacidad del sistema para mantener en dispersión una fase en la otra o relacionar con el volumen las fases separadas. La teoría DLVO explica y plantea dos tipos de fuerzas, las de atracción y de repulsión, representado por las fuerzas de London y Van der Waals, y las producidas por las capas eléctricas de las interfases respectivamente, que ejercen influencia en las partículas

dispersas (Mercado et al., 2008). Se dice que las emulsiones son cinéticamente estables y por ello es necesario esclarecer las variables que afectan el sistema emulsionado (Matos et al., 2020). Entre ellas se encuentran las variables de formulación que abarca todas las características, propiedades y condiciones de cada uno de los componentes del sistema como el pH de la fase acuosa, HLB del surfactante, así como la temperatura y naturaleza de las fases. La relación entre la cantidad de aceite, agua y concentración de agentes surfactantes o modificadores forman parte de las variables de composición y, por último, los factores fluomecánicos que abarca la técnica adoptada para la formulación, como la agitación, equipo para agitar y forma del rotor (Márquez et al., 2007; Mercado et al., 2008).

Las emulsiones cumplen el rol de separarse para que el ligante cumpla su función de unirse a los agregados ya que la carga eléctrica que tiene el material pétreo neutraliza las partículas cargadas de asfalto en la emulsión y hace que estas se conglomeren, así como la desestabilización del sistema que puede darse por diferentes mecanismos que tienen la cualidad de ser consecutivos en algunos casos (Rodríguez et al., 2001; Tolosa, 2016). El cremado o sedimentación se rige por factores como la gravedad, los campos eléctricos presentes y viscosidad de sus componentes, en dónde las gotas se agrupan sin estar en contacto entre ellas y sin variar el tamaño de estas, es un proceso reversible y dependerá de la densidad de la fase continua si la agrupación se da en el tope o en el fondo de la emulsión (Gómez, 2014).

La floculación es el siguiente paso, aquí las gotas se han agrupado mucho más y solo las separa una pequeña película de fase continua, este proceso mantiene un equilibrio entre las fuerzas presentes lo cual permite que sea un proceso reversible, aunque en algunos casos depende de la intensidad de las fuerzas de Van der Waals presentes (Lendínez, 2015). La coalescencia es el paso final ya que está marcada por ser un proceso irreversible, es en donde las gotas se fusionan entre

sí para aumentar su tamaño y con el transcurrir del tiempo se manifiesta la separación de fases (Gómez, 2014). Sin embargo, las emulsiones asfálticas tienen un amplio campo de acción en áreas de tránsito y sus principales usos son el reciclado de asfalto, tratamientos superficiales de vías y aplicaciones como estabilizaciones de capas del suelo, recubrimientos, entre otros (AEMA & Asphalt Institute, 2008).

2.11 Emulsiones modificadas

El inicio de nuevos desafíos para garantizar una estructura vial adecuada promovió el desarrollo de diferentes técnicas que permiten dar lugar a nuevos tipos de soluciones en virtud de vencer las limitaciones en el desempeño de emulsiones convencionales (Rodríguez et al., 2001). Es así que las emulsiones modificadas nacen a partir de la innovación y desarrollo tecnológico de la industria en donde se introduce un agente modificador que ofrece la capacidad de mejorar propiedades reológicas, mecánicas, susceptibilidad térmica y estabilidad (Rendón & Torres, 2018). Diferentes fuentes como (Arenas, 2006; Manjarrés, 2023; Mercado et al., 2008; Özdemir, 2023; Rendón & Torres, 2018; Repsol, 2014; Rodríguez et al., 2001; Velásquez et al., 2020) entre otros, ilustran resultados que proporciona la modificación, demostrando el impacto en el mejoramiento de las propiedades y comportamiento del material a diferentes condiciones, resultando en una mejor eficiencia para la fabricación y aplicación de emulsiones.

La ciencia de los aditivos a través de innovaciones tecnológicas ha brindado la posibilidad de personalizar e implementar productos que impacten en el rendimiento de la emulsión (G. Jordaan et al., n.d.). La nanotecnología se basa precisamente en la generación de estos materiales funcionales a nivel molecular y a escala nanométrica, que se conocen como nanomateriales. Los diferentes materiales que se pueden encontrar son el cloruro de calcio, tripolifosfato de sodio, espesantes y promotores de adhesión entre los cuales se encuentran los nanosilanos uno de los más

importantes a raíz de sus múltiples ventajas, su grado de control y propiedades fisicoquímicas e interfaciales, además de ser un compuesto ecológico (Caballero & González, 2018; G. Jordaan et al., n.d.; Zumba & Quinga, 2022). Los silanos organofuncionales son compuestos con la capacidad de interactuar física y químicamente para lograr cambios mejorados en la reología, resistencia y estabilidad, así como moldear las propiedades mecánicas y durabilidad del ligante (Puerto, 2019). Sus características más relevantes son su gran área superficial específica, alta adsorción, elevada pureza química y estabilidad, además de su notable funcionalidad que le permite llevar a cabo la transición de hidrófila a hidrofóbica (Mirabdolazimi et al., 2021). Específicamente las nanotecnologías aplicadas para optimizar y preservar los materiales de construcción se han basado en organosilanos, derivados del silicio, principalmente aprovechando su abundancia en la naturaleza y capacidad para formar uno de los enlaces químicos más fuertes.

En segunda instancia, su funcionalidad, ya que presenta un grupo reactivo y uno muy estable no reactivo, afines a materiales inorgánicos y materiales orgánicos respectivamente, lo que brinda a cada partícula la destreza para transformar su carácter hidrofílico a hidrofóbico, así como neutralizar la aparición de minerales secundarios nocivos para la estructura vial y minimizar el efecto de la descomposición química (Akhalwaya, 2022; G. J. Jordaan & Steyn, 2021d). Al mismo tiempo se desempeña como agente estabilizador de las partículas dispersadas, creando una capa estable protectora alrededor de las partículas de asfalto que evita la aglomeración contribuyendo en la estabilidad del sistema. Dado que, en el proceso de fabricación, las fuerzas brownianas superan las fuerzas gravitacionales (G. J. Jordaan & Steyn, 2021c).

3. Estado del arte

Colombia es un país donde gran parte de su economía depende de la producción agrícola, la cual se ubica principalmente en las zonas rurales. Las vías que conectan estas zonas con las grandes ciudades se denominan vías terciarias y representa la red vial más extensa del territorio, con un estimado de 143.000 km de vías terciarias de las cuales únicamente el 6% se encuentran pavimentadas (Agudelo, 2022).

En este contexto, las vías terciarias son vitales para el desarrollo económico y sostenible del país y la implementación de emulsiones asfálticas nanomodificadas (NME, por sus siglas en inglés) emerge como una tecnología prometedora para mejorar la infraestructura vial y contribuir a la conexión de aquellas comunidades remotas (Dhriyan & Garg, 2017; Rubiños, 2024). Las emulsiones son componentes tecnológicos aplicados al campo de mezclas asfálticas en frío que permiten la manipulación del ligante a temperatura ambiente; empleadas para las estructuras viales de tránsito con viabilidades económicas y ecológicas, sin embargo, deben cumplir criterios de ejecución técnica (G. Jordaan et al., 2017). Lo que ha llevado al avance de nuevas estrategias para propiciar rendimientos eficientes y sostenibles, por lo cual se realizan modificaciones con diferentes materiales o técnicas de elaboración que ofrecen innumerables beneficios (Dash et al., 2022; Shanbara et al., 2021).

Entre los modificadores se encuentran los nanomateriales que ofrecen grandes perspectivas en el desempeño ingenieril de los materiales, beneficios ambientales y autosuficientes (G. J. Jordaan & Steyn, 2022; Rust et al., 2022). Permitiendo introducir agentes estabilizantes que cambian las propiedades fisicoquímicas de la emulsión. Por su escala presentan una gran área superficial facilitando su interacción, demostrando ahorro en costos, tiempo y optimización

significativa en su estabilidad y durabilidad, adjudicándose un gran potencial en aplicaciones de pavimentos, exponiendo mejoras considerables sobre el uso de materiales marginales y sus propiedades (Afshin & Behnood, 2025; G. Jordaan et al., 2017).

Uno de los compuestos destacados son los nanosilanos, derivados del silicio, elemento con gran abundancia en la naturaleza y excelentes propiedades mecánicas, área superficial, ópticas, térmicas y eléctricas lo que permite adaptarlas fácilmente y garantizar una alta estabilidad (Björkegren et al., 2017; Caballero & González, 2018). El componente modificador a base de silanos organofuncionales, contiene dos grupos reactivos diseñados para unir eficazmente el material agregado con el agente estabilizador de la mezcla asfáltica, mediante enlaces siloxano, permitiendo conferirle al material la capacidad hidrofóbica, resultando en un mejor desempeño y amigable con el ambiente. Las características del agente estabilizante de la emulsión y el control de la mineralogía del agregado o modificación son vitales para cumplir su función de adherencia (G. J. Jordaan & Steyn, 2021a, 2021c).

Resultados de estudios previos resaltan la aplicabilidad de la nanosílice y en específico el uso de nanosilanos como modificador de aglutinantes o emulsiones, entre otras aplicaciones (Chen & Li, 2021; Guo et al., 2018; Puerto, 2019; Zhou et al., 2024). Otorgando puntuales características mejoradas en cuanto al módulo de corte complejo, ángulo de fase, envejecimiento, dispersión y recubrimiento, en consonancia con el consumo de energía y costos de operación (Guo et al., 2019; Zhou et al., 2024). Otros estudios exponen la aplicación de emulsión modificada con nanosílice como variante a la limitación y elevados precios de recursos no renovables idóneos para la construcción de carreteras, estabilizando un material considerado de baja calidad compatible con la emulsión, mejorando la cohesión, relación de carga, resistencia a la compresión y daño por humedad (Chilukwa & Mostafa, 2023; Rust et al., 2022).

Cifuentes (2019) y Vargas (2023) muestran que, para la fabricación de una emulsión ya sea catiónica o aniónica, la adición de nanomaterial permitió reducir proporcionalmente el tamaño de gota y coalescencia. Taylor & Willis (2012) a través de un proyecto investigativo evaluaron el efecto que implicaba la adición de un nanomaterial a base silanos organofuncionales y determinaron que, aun con menor porcentaje de ligante residual la nano permitía obtener un comportamiento equivalente al de una emulsión sin modificar; mejoraba la adhesión, así como un 15% menos los gastos de producción.

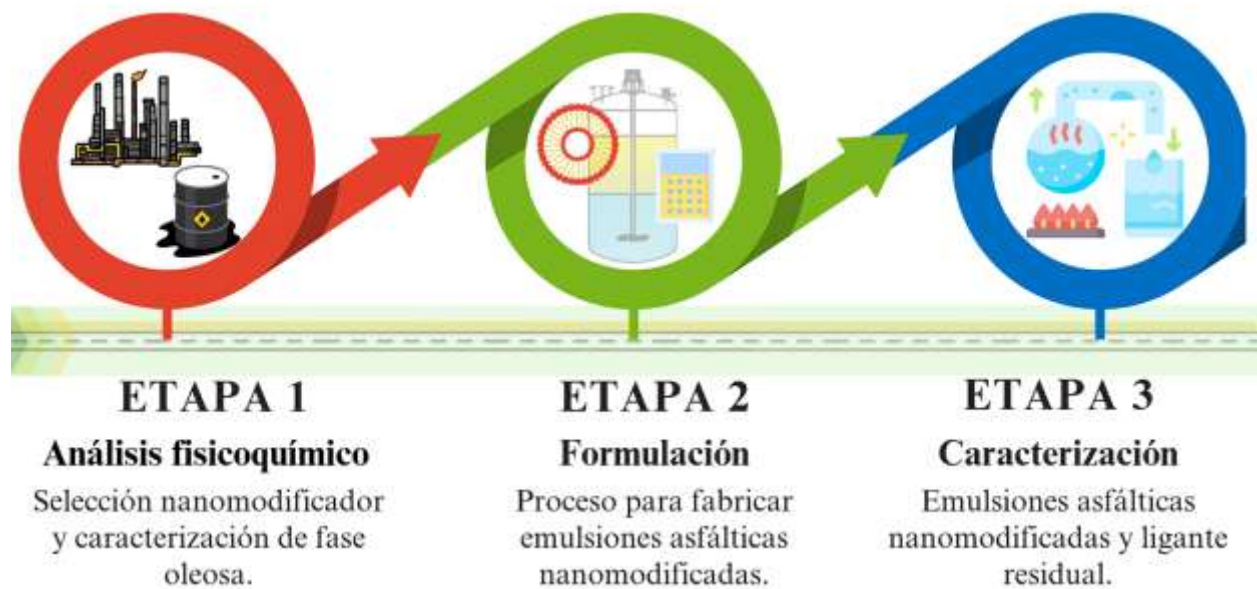
En Sudáfrica, las aplicaciones demuestran que la implementación de emulsiones aniónicas modificadas con nanosilanos reduce el contenido de la suspensión en las mezclas bituminosas, además de utilizar materiales marginales en la estabilización de base y subbase en la estructura de vías con bajo volumen. Llevando a reducciones considerables en costos de un 30% y 50%, sin comprometer la integridad de la estructura según Jordaan & Steyn (2022, 2021c). En particular, algunos aditivos compuestos por silanos son ZycoTherm y NanoTac, recientemente utilizados como aditivos modificadores para optimizar el pavimento resultan atractivos al revelar propiedades reológicas mejoradas, alta estabilidad y resistencia de las mezclas (I. Ali et al., 2023; Jain & Dwivedi, 2018; Taylor & Willis, 2012). Analizando los diversos resultados, la aplicación de emulsiones nanomodificadas es una alternativa prometedora que permite mejorar el estado de las vías terciarias en el país, además de contribuir al ahorro en costos de implementación y fácil adaptabilidad en su aplicación.

4. Metodología

La metodología empleada para alcanzar los objetivos planteados se estructuró en tres etapas, representadas de forma general en la Figura 3.

Figura 3

Etapas metodológicas para la formulación y caracterización de emulsiones asfálticas nanomodificadas



A continuación, se detallan las etapas correspondientes.

4.1 Etapa 1: Selección de modificador a emplear en la formulación de NME

En esta fase inicial, se llevó a cabo una revisión bibliográfica enfocada a emulsiones asfálticas modificadas con nanosilanos y otros nanomateriales, se identificaron estudios previos realizados donde se encontró que el nanocompuesto conformado por organosilanos es óptimo para la estabilización y aplicación de materiales granulares marginales (Chen & Li, 2021; G. Jordaan et al., n.d.; G. J. Jordaan & Steyn, 2022; Mirabdolazimi et al., 2021). Continuando con el análisis fisicoquímico de la fase oleosa mediante los ensayos de la normativa INVIAS (Instituto Nacional

de Vías - INVIAS, 2022), ver la tabla 1. Con el fin de analizar propiedades claves viscosidad, penetración, reología, entre otras. Estos resultados permitieron establecer las características del material base y el impacto del tratamiento de modificación.

Tabla 1

Pruebas de caracterización fisicoquímica y reológica al ligante original

Ensayo	Norma	Objetivo
Ductilidad	INV E-702	Resistencia a la rotura por medio del alargamiento
Contenido de agua	INV E-704	Agua presente en materiales asfálticos
Contenido de cenizas	INV E- 705	Contenido de material inorgánico
Penetración	INV E-706	Consistencia del material
Densidad	INV E-707	Medida indirecta de la masa
Punto de inflamación	INV E-709	Temperatura de ignición en presencia de una chispa
Punto de ablandamiento	INV E-712	Indicador de la tendencia del material a fluir
Solubilidad en tricloroetileno	INV E-713	Determinar la pureza, materia inorgánica y cementantes activos
Viscosidad	INV E-717	Capacidad de fluidez, temperaturas de manipulación, mezcla o aplicación
Pérdida de masa - RTFO	INV E-720	Cambio de masa y cambio aproximado de las propiedades del material
Resistencia al corte dinámico	INV E-750	Módulo de corte dinámico y ángulo de fase del material
Análisis SARA	ASTM D2007 & D2549	Composición química, clasificación de saturados, aromáticos, resinas y asfáltenos
Insolubles en heptano	ASTM D3279	Cuantificar el contenido de asfáltenos
Creep multi stress	ASTM D7405	Respuesta elástica del material

Asimismo, se evaluaron variables operativas y condiciones ambientales relevantes para la formulación, tales como el método de agitación, características de los componentes, tiempos de incorporación y secuencia de adición de fases. Esta etapa fue clave para comprender los efectos del nanomodificador sobre las propiedades del asfalto y establecer las condiciones óptimas de formulación (Yaacob et al., 2013, G. Jordaan et al., n.d.).

4.2 Etapa 2: Formulación de emulsiones asfálticas nanomodificadas

En esta etapa, se realizó la modificación de una emulsión catiónica comercial con dos nanocompuestos a base de silanos organofuncionales, los cuales fueron NanoTac y ZycoTherm, ambos compuestos presentan estructuras similares, salvo por la presencia de alcohol bencílico en el componente ZycoTherm (Zydex Industries, 2018a, 2018b). Se continuó fabricando emulsiones aniónicas sin modificación evaluando visualmente su capacidad de permanecer en una sola fase, aplicando un ajuste a la norma INVE-764 al momento de realizar el muestreo ya que no se contó con el equipo específico de acuerdo con lo encontrado en la literatura (Arshad et al., 2024; McCoy & Smith, 1949; Mercado & Fuentes, 2016; Porto et al., 2021, G. Jordaan et al., n.d.). Para luego realizar la modificación de emulsiones, se ofrece una descripción de los valores a considerar para cada variable en la tabla 2.

Tabla 2

Formulación de emulsiones asfálticas nanomodificadas

Emulsiones catiónicas			
Prueba	Modificación %	Emulsión	
1	0,75	CRL - 1	
Emulsiones aniónicas			
Prueba	Modificación %	Proporciones Asfalto / Fase acuosa [% p/p]	Emulgente %
2	0,2		
3	0,75		
4	1	60/40	0
5	0,2		
6	0,75		
7	1	60/39,5	0,5
8	0,2		
9	0,75		
10	1	60/39	1

Para la fabricación se utilizó un equipo agitador de cizallamiento de alta velocidad, constituido por un rotor con dos paletas planas junto a un estator ranurado por dos orificios, que

favorecen el tipo de flujo radial. Junto con agua, provista del grifo para aumentar su aplicabilidad en campo, el asfalto aplicado presenta un balance óptimo entre rigidez y flexibilidad, al igual que es muy comercial. Sumado a esto, el surfactante aplicado se detalla en la tabla 3.

Tabla 3

Características generales del surfactante utilizado

Nombre	Ácido sulfónico de alquibenceno lineal	
Formula química	Mín: C16H26O3S	Máx: C19H32O3S
Densidad [g/ml]	1,2	
pH en fase acuosa	1-2	

Nota. Adaptado de Hoja de seguridad ácido sulfónico lineal, SUQUIN LTDA.

Este compuesto es muy comercial en la industria, sus propiedades interfaciales y de aplicación le permiten actuar adecuadamente como tensioactivo (Ácido Sulfónico Lineal, n.d.; Schwuger, 1984). Se estableció un pH de 11, ajustado mediante hidróxido de sodio (NaOH) a una concentración de 1 M, siguiendo los lineamientos propuestos por Salager (2002), Querol (2018), y Salomon (2006). También se analizó la naturaleza del emulgente, empleando una emulsión catiónica comercial, cuya ficha técnica sirvió como referencia para definir parámetros de compatibilidad (“Ficha Técnica Emulsiones Asfálticas,” n.d.).

4.3 Etapa 3: Caracterización de emulsión asfáltica modificada con nanosilanos

En esta fase, se realizó la caracterización y evaluación de las emulsiones obtenidas con base en los ensayos INVIAS y normas ASTM presentados en la tabla 4, con el propósito de identificar los factores que influyeron en la estabilidad y características de las emulsiones asfálticas, considerando la estabilidad a partir del residuo por evaporación a las 24h y 5 días, además de analizar las propiedades del ligante residual.

Tabla 4*Ensayos de caracterización para emulsiones asfálticas*

Ensayos sobre emulsión	Norma	Objetivo
Estabilidad	INV E-771	Capacidad de permanecer en dispersión ajustada a residuo por evaporación
Tamizado	INV E-765	Aglomeración de partículas de la fase dispersa
Destilación	INV E-762	Determinar cuantitativamente el residuo de la emulsión
Ensayos sobre el ligante residual		
Penetración		INV E-706
Punto de ablandamiento		INV E-712
Solubilidad en tricloroetileno		INV E-713
Viscosidad		INV E-717
Pérdida de masa - RTFO		INV E-720
Resistencia al corte dinámico		INV E-750
Insolubles en heptano		ASTM D3279
Creep multi stress		ASTM D7405

Los resultados obtenidos en esta etapa permitieron establecer las formulaciones más estables y con mejor desempeño reológico, evidenciando una influencia positiva de la nanosilanos sobre las propiedades del sistema. Esta información fue fundamental para validar el uso de nanomodificadores en mezclas aplicables a pavimentos flexibles.

5. Resultados

5.1 Selección y caracterización de componentes

5.1.1 Selección del agente modificador y caracterización de base asfáltica

En función de la revisión bibliográfica realizada (Afshin & Behnood, 2025; Akhalwaya, 2022; Caballero & González, 2018; Gómez, 2014; G. Jordaan et al., 2017; Tolosa, 2016) se

evidenció que el uso de nanomateriales, en particular los nanosilanos, tiene un efecto positivo en la mejora de mezclas asfálticas que emplean materiales con bajo desempeño mecánico. Estos compuestos han demostrado ser efectivos en la estabilización de materiales granulares marginales y en la mejora de las propiedades reológicas del ligante (Aranberri et al., 2009; G. Jordaan & Steyn, 2019).

Como resultado de esta evaluación, se seleccionaron dos nanoaditivos disponibles en el laboratorio: NanoTac y ZycoTherm, ambos formulados a partir de silanos organofuncionales. Estos compuestos actúan como promotores de adhesión al formar enlaces químicos fuertes con la superficie del agregado (NanoTac, n.d.; ZycoTherm, n.d.). Las principales características fisicoquímicas de estos productos se resumen en la tabla 5.

Tabla 5

Propiedades fisicoquímicas de los modificadores utilizados

Característica	NanoTac	ZycoTherm
Estado físico	Líquido	
Color	Amarillo pálido	
Viscosidad [Pa*s]	0,1 – 0,5	0,7 ± 0,3
Densidad [g/ml]	1,03 – 1,05	1,00 – 1,02
Punto de inflamación [°C]	>95	>80

Nota. Adaptado de NanoTac & ZycoTherm Safety Data Sheets, por Zydex Industries (2016).

5.1.1.1 Parámetros técnicos para la formulación de emulsiones. El proceso de emulsificación requiere una dispersión eficiente del asfalto en la fase acuosa, lo cual implica una considerable entrada de energía mecánica para incrementar el área interfacial. Este proceso se logra mediante equipos como agitadores de alta cizalla, homogeneizadores o molinos coloidales (Lendínez, 2015; Matos et al., 2020). En esta investigación, se empleó un sistema de emulsificación en dos etapas: (1) acondicionamiento de las fases, y (2) mezcla controlada. El acondicionamiento térmico consistió en calentar el asfalto hasta temperaturas entre 110 °C y

150 °C, a fin de disminuir su viscosidad y facilitar su atomización. Simultáneamente, el agua se calentó entre 60 °C y 85 °C, con el objetivo de mejorar la solubilidad del tensioactivo y reducir la pérdida por evaporación durante la emulsificación (Abd El-Rahman et al., 2017; Gutiérrez, Rincón, Hernández, et al., 2002; Ulloa, 2012). Para preservar la estabilidad del sistema, la temperatura final de la emulsión no superó los 100 °C.

En cuanto a la dosificación, se aplicó el método convencional de adición progresiva de la fase dispersa (asfalto) sobre la fase continua (agua con surfactante), bajo agitación constante (Querol et al., 2017; Zhou et al., 2024). La concentración del emulsificante, que influye directamente sobre el tamaño de gota y la estabilidad de la emulsión, fue ajustada en función del tipo de sistema (catiónico o aniónico), generalmente no supera el 3% en peso del sistema (Zapata, 2023).

Además, se evaluaron estrategias para la incorporación del nanomodificador, siguiendo dos enfoques reportados en la literatura: (1) adición del modificador a la emulsión ya preparada, (2) incorporación durante el proceso de emulsificación (Biradarpatil & Jaya, 2017; Meng et al., 2023; Peng et al., 2024). Con base en estas consideraciones técnicas y bibliográficas, se definieron los parámetros óptimos para la formulación de emulsiones asfálticas nanomodificadas, los cuales se aplicaron en la etapa experimental de este estudio.

5.1.2 Caracterización fisicoquímica fase oleosa

Con el objetivo de establecer las propiedades fundamentales del ligante previo a su modificación, se realizaron ensayos fisicoquímicos y reológicos de acuerdo con la normativa INVIAS para determinar las propiedades del ligante asfáltico. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.

Tabla 6*Resultados caracterización material ligante original*

Propiedad	Unidad	Valor
Ductilidad a 25°C	cm	>100
Contenido de agua	%	0
Contenido de cenizas	%	0,08
Penetración a 25°C (100 g, 5 seg)	0,1 mm	69
Gravedad especifica a 25°C	kg/cm ³	1.001
Punto de inflamación	°C	295
Punto de ablandamiento	°C	47
Solubilidad en tricloroetileno	%	99,6
Viscosidad dinámica	60°C	Pa · s
	135°C	
Pérdida de masa - RTFO	%	0,5
Saturados	%	33,1
Aromáticos	%	27,7
Resinas	%	22,1
Asfáltenos	%	17,2
Insolubles en heptano	%	14,2

La muestra analizada satisface los requerimientos de la normativa INVIAS (Instituto Nacional de Vías - INVIAS, 2022), para un cemento asfáltico con grado de penetración 60/70. Algunas propiedades como su ductilidad, viscosidad, entre otros, lo califican como adecuado para la elaboración de mezclas asfáltica por su dureza y durabilidad de nivel intermedio, permitiéndole soportar altas cargas de tráfico y fluctuaciones ambientales haciéndolo útil para la construcción de pavimentos flexibles (Arenas, 2006; Cemento Asfáltico 60/70, n.d.).

La capacidad del betún para dispersarse en el agua depende en cierta medida de su compleja estructura y composición química, por lo cual se puede evaluar mediante la relación de algunos de sus componentes inherentes. La relación resinas/asfáltenos es igual a 1,3, encontrándose dentro del rango optimo (0,5-2,0) indicando buena aptitud para la emulsificación (Abdullin & Emelyanycheva, 2020). La alta solubilidad en tricloroetileno (99,6%) y el bajo contenido de cenizas (0,08%) refuerzan su pureza y baja presencia de contaminantes sólidos promoviendo las

emulsiones directas, ya que no se presenta la adsorción de asfáltenos sobre su superficie, que conlleva a presentar un carácter lipofílico en la interfase, es decir emulsiones inversas. Traduciéndose en aplicar bajas concentraciones de surfactantes debido a la prevalencia del carácter hidrofílico en su interfase (M. F. Ali & Alqam, 2000). De igual manera, se evidencia una alta susceptibilidad térmica debido al cambio de viscosidad a altas temperatura lo que favorece su manejabilidad.

5.1.3 Propiedades reológicas

La evaluación reológica se llevó a cabo mediante el equipo DSR (Dinamyc Shear Rheometer), con el fin de analizar el comportamiento viscoelástico del ligante original y envejecido. Se determinaron los parámetros de módulo de corte complejo (G^*) y ángulo de fase (Θ) (ver tabla 7). Indicadores clave para predecir la susceptibilidad al ahuellamiento y fatiga bajo el marco de especificaciones Superpave.

Se propone un criterio limite en las mezclas asfálticas para tener un balance adecuado entre la rigidez y elasticidad que promueve la vida útil y desempeño, por lo tanto, la relación (G^*) o $\text{Sen}(\Theta)$ grado de desempeño debe presentar un valor, a determinada temperatura, mayor o igual a 1 KPa y 2,2 KPa para materiales sin y con envejecimiento a corto plazo respectivamente (Castro et al., 2016). Además, se practicó el ensayo de fluencia y recuperación que de igual manera analiza la deformación no recuperable, sus resultados revelan una fuerte relación con el desempeño real final (Adwani et al., 2024).

Las condiciones de los ensayos realizados al ligante original y envejecido se rigieron por las condiciones establecidas en la norma INV E-750 y ASTM D7405. El barrido de tiempo se estableció a temperaturas intermedias y altas con el propósito de evaluar la susceptibilidad térmica de la emulsificación y posterior modificación, teniendo en cuenta que la temperatura para cumplir

con el umbral de Superpave según lo reportado en la literatura es de 64°C (Castro et al., 2016; Elizondo et al., 2010; Rondón et al., 2016), por lo cual se contrasta perfectamente con los resultados obtenidos en la tabla 6 debido a que el material sin modificación no cumple con la especificación, presentando así más problemas por factores de ahuellamiento a estas temperaturas y suponiendo mejores comportamientos por debajo de estas.

Tabla 7

Propiedades reológicas ligante original

Temperatura [°C]	Ángulo de fase Θ [°]	G^* [kPa]	$\frac{G^*}{\text{Sen}(\Theta)}$
70	86,8	0,78	0,8
76	87,8	0,39	0,4
82	88,5	0,21	0,2
Envejecido			
70	82,6	2,12	2,1
76	84,6	0,99	1,0
82	86,2	0,49	0,5

Se realizó el ensayo Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) para evaluar la deformación no recuperable y la recuperación elástica bajo tensiones de 0,1 KPa y 3,2 KPa. A continuación, se presentan los resultados.

Tabla 8

Resultados ensayo MSCR para asfalto original

Temperatura [°C]	Tensión aplicada [kPa]	0,1	3,2	0,1	3,2
		% Recuperación		Jnr [1/kPa]	
48		4,1	2,0	0,0025	0,0027
60		0	0	0,0162	0,0179
78		0	0	0,1603	0,1797
ENVEJECIDO					
48		9,0	8,5	0,0007	0,0007
60		2,9	0,5	0,0052	0,0059

78	0	0	0,0626	0,0787
----	---	---	--------	--------

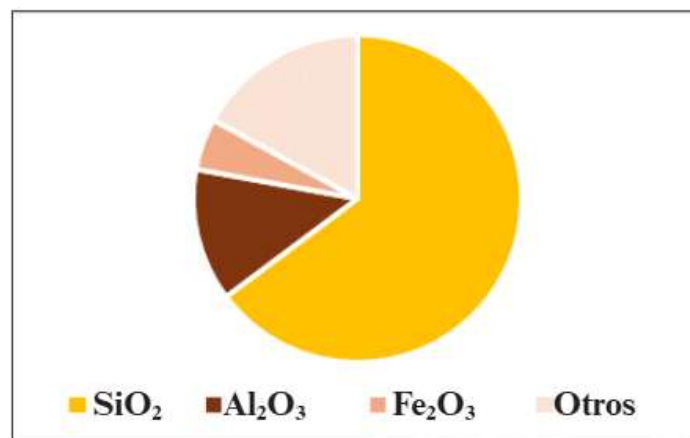
De la tabla 8, se evidencia que, a 60°C, la muestra original exhibe una recuperación nula, lo que indica su temperatura crítica de falla. Tras el envejecimiento, se observa una mejora relativa en la recuperación y una menor deformación permanente, reflejando naturalmente el proceso de endurecimiento del ligante

5.1.4 Caracterización mineralógica del agregado pétreo

La caracterización proporcionó la mineralogía de un material pétreo que se pretende usar en la aplicación final de la emulsión nanomodificada fabricada se muestra en la Figura 5, resultando en mayores proporciones los compuestos de sílice que son ideales para la interacción química entre el agente estabilizante y el agregado, adjudicando propiedades de adhesión y carácter hidrofóbico, transformándose en una mezcla resistente y duradera (G. J. Jordaan & Steyn, 2021a).

Figura 4

Caracterización química material granular



5.2 Formulación de emulsiones asfálticas nanomodificadas

En primera instancia se establecieron emulsiones bituminosas sin modificar, con el propósito de establecer una metodología eficiente al evaluar las condiciones del proceso y de

operación tanto de la emulsificación como la modificación (ver tabla 9). Por consiguiente, se adicionó la totalidad de la fase oleosa en dos instantes diferentes con el fin de garantizar una correcta homogenización y en simultáneo encender el iniciar de agitación con una potencia gradual durante 5 minutos. Estableciendo inicialmente una temperatura de 80°C y 110°C para el agua y el asfalto respectivamente. La condición de pH para la emulsión será la misma que se establece para la fase jabonosa manteniendo la premisa de que asfalto no afectará significativamente este valor (Acevedo et al., 2001; Mercado et al., 2008).

Se realizaron dos pruebas iniciales con valores de pH 9 y 10 (ver Figuras 5b y 5c), intentando relacionar valores preestablecidos para la clasificación de emulsiones, pero las condiciones de las fases no presentaron su función adecuada, adjudicándose a una inapropiada configuración en su HLB que lleva a un aumento en la tensión interfacial y tamaño de partícula, fomentando la coalescencia y la separación de fases resultando en emulsiones inestables (Al-Sabagh, 2002; Lindner et al., 2018). Aunque la emulsión con un pH de 11 presentó una película superior de asfalto (ver Figura 5a) que se atribuye a la alta viscosidad del asfalto, fue posible homogenizar mediante una ligera agitación revelando así una emulsión estable y ubicándose en el rango de pH para emulsiones asfálticas aniónicas de rompimiento lento según diferentes autores (G. Jordaan et al., n.d.; Querol, 2018; Salomon, 2006).

Tabla 9

Formulación de emulsiones asfálticas

#	% Asfalto	% Agua	% Emulgente	pH	Estabilidad visual (24h)
1	60	39	1	9	Separación de fases
2	60	39	1	10	Separación de fases
3	60	39	1	11	Presencia excesiva de espuma
4	60	39,8	0,2	11	Separación de fases
5	60	39,6	0,3	11	Separación de fases
6	60	39,8	0,4	11	Separación de fases
7	60	39,5	0,5	11	Separación de fases

8	60	38,5	1,5	11	Presencia excesiva de espuma
9	60	37,5	2,5	11	Presencia excesiva de espuma
10	60	38,8	1,2	11	Capa de espuma
11	60	38,5	1,5	11	Capa de espuma
12	60	38,5	1,5	11	Capa de espuma
13	60	39,1	0,9	11	Capa de espuma
14	60	38,3	1,7	11	Estable con ligera formación de espuma
15	60	38,7	1,3	11	Estable con ligera formación de espuma
16	60	38,8	1,2	11	Estable con ligera formación de espuma
17	60	39,1	0,9	11	Estable con ligera formación de espuma
18	60	39,2	0,8	11	Estable con ligera formación de espuma
19	60	39,5	0,5	11	Estable con burbujas en superficie
20	60	38,5	1,5	11	Estable con ligera formación de espuma
21	60	37,5	2,5	11	Presencia excesiva de espuma

Figura 5

Emulsiones asfálticas con dificultad de homogenización



Nota. Aspecto físico de emulsiones con altos índices de inestabilidad a) incorrecta homogenización, b) emulsión con alta viscosidad, c) alto índice de inestabilidad (cremado).

En vista de un evidente incremento en la viscosidad de las fracciones finales de asfalto, dado por la disminución de temperatura en el transcurso de la dosificación, se decidió aumentar la temperatura para la fase oleosa.

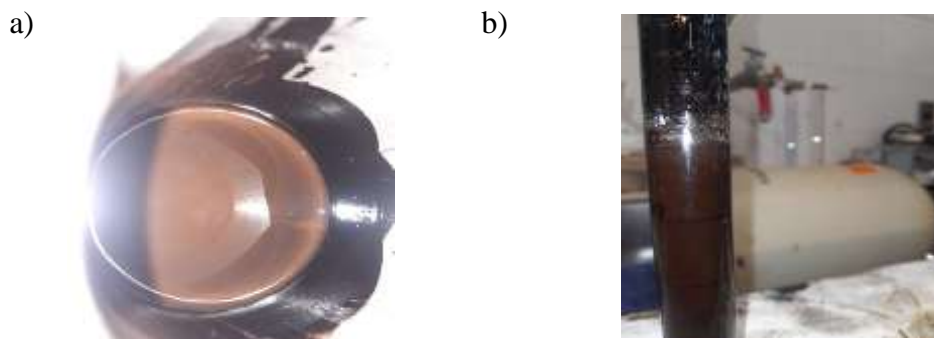
Y a partir de la emulsión número 9 se estableció un valor de 130°C para el asfalto, ajustado a una dosificación lenta y continua durante 1 minuto. La agitación disminuyó a 3 minutos y se realizó en solapamiento con el paso anterior, variando la potencia de agitación desde lo más

mínimo posible hasta la media potencia proporcionada por el equipo. Resultando en emulsiones inestables debido a una definida capa de cremado. Y fue causa de la formación de espuma, indicio claro de la entrada de aire al sistema que interacciona para crear interfaces aire-agua más compactas, delimitando la formación de la interfaz agua-asfalto, a causa de una disminución en la adsorción del surfactante e interacciones débiles con el betún (Anachkov et al., 2015).

Desde la emulsión fabricada número 14 se adoptan los criterios de operación y de proceso explicados en detalle en los numerales 5.2.1 y 5.2.2, logrando obtener emulsiones presentadas en la Figura 6a y 6b. Tomando como referencia este proceso, se procedió a realizar análisis experimentales como lo fue la adición de agua al asfalto, determinando un menor control en la evaporación de agua al momento de la dosificación por el choque térmico tan drástico, originando un cambio en las proporciones de la emulsión impactando negativamente en el desempeño y aplicabilidad dado que se obtuvieron emulsiones inversas. También, se analizó el acondicionamiento de la fase jabonosa en un baño maría para controlar la volatilización de agua, sin embargo, esta condición no tuvo incidencia en los resultados obtenidos.

Figura 6

Emulsiones asfálticas fabricadas



Nota. Emulsiones asfálticas estables a) aspecto visual de homogenización, b) prueba visual de estabilidad emulsión con 0,5% de surfactante.

De manera similar, se verificó el instante de aplicación para el agente modificador mediante dos formas. Primero, agregando el modificador a la fase jabonosa antes de la emulsificación y segundo, modificando la emulsión posteriormente con el nanosilano. Se observó que con la adición del nanosilano a la fase jabonosa este sufrió un proceso de transformación, lo que permite inferir una interacción química de los componentes del modificador, induciendo la hidrólisis y condensación de los componentes silanos (Meng et al., 2023). En este punto, la solución alcalina usada para modificar el pH de la solución jabonosa actuó como catalizador para formar enlaces específicos y crear una red polimérica (ver figura 7) que condujo a la gelificación y agregación de sílice puro (Brinker & Scheler, 1990; Schwuger, 1984). Bajo estas condiciones, es muy probable que las partículas de sílice estén floculadas, generándose emulsiones inestables (Binks & Whitby, 2005). Lo que permite corroborar que la técnica adecuada es emulsificar antes de modificar, permitiendo además un mayor control y menor dificultad para el proceso de emulsificación.

Figura 7

Modificación antes de la emulsificación



Luego de cada proceso y para confirmar la correcta formulación y dispersión de las fases, se realizó una prueba rápida denominada prueba de la gota que permitió identificar si las emulsiones eran de carácter directo o inverso (Aranberri et al., 2009; Liang, 2010), y consistió en

dejar caer una gota de emulsión sobre un líquido, en este caso fue el agua. Si la gota se dispersa al entrar en contacto con el agua (ver figura 8a) se habla de emulsiones directas o de asfalto en agua. En caso contrario, que la gota no se disperse en agua (ver figura 8b), se tienen emulsiones inversas o de agua en asfalto cuya característica principal es su gran viscosidad.

Figura 8

Prueba de la gota para emulsiones



Nota. Aspecto visual de emulsiones a) directas, b) inversas.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se estableció el siguiente proceso para obtener emulsiones asfálticas nanomodificadas estables y directas.

5.2.1 *Condiciones de formulación*

Teniendo en cuenta todos los resultados obtenidos de las variables de formulación estudiadas, a continuación, se propone el siguiente procedimiento para la formulación de emulsiones asfálticas nanomodificadas:

1. Inicialmente se debe inducir calentamiento al bitumen hasta lograr una temperatura completamente homogénea de 125°C a 130°C.
2. Cuantificar el peso de emulgente y agua según las proporciones deseadas, en específico para este proyecto, las expuestas en la tabla 2.
3. Agitar la mezcla de agua con emulgente aniónico hasta obtener una solución completamente homogénea

4. Realizar una solución alcalina con el objetivo de adicionar a la solución homogénea previamente preparada para modificar el pH. Se implementó hidróxido de sodio con concentración de 1 M.
5. Una vez ajustado el pH requerido, proporcionar calor a la solución para alcanzar una temperatura en un rango entre 70°C a 75°C
6. Introducir el vástago del agitador dentro de la solución jabonosa al menos un minuto antes de iniciar el vertimiento del asfalto, evitando crear interfases gas-liquido
7. Dosificar lentamente el asfalto a la solución jabonosa en un intervalo de 1 minuto
8. Iniciar la agitación manual y gradual al mismo tiempo que se adiciona el asfalto, durante 30 segundos
9. Al instante, encender el equipo de agitación, manteniendo el cabezal de agitación dentro de la solución durante la transición de las fases
10. El equipo se enciende a una velocidad mínima y conjuntamente se continúa realizando movimientos manuales aleatorios, aumentando de manera progresiva su potencia a medida que alcance el 50% de su capacidad en un tiempo de 3 minutos
11. Retirar lentamente el vástago de agitación y permitir que los remanentes decanten dentro del recipiente
12. Esperar a disponer de un registro térmico de la mezcla con un valor aproximado de 50°C
13. Suministrar la concentración requerida de agente modificador
14. Ingresar nuevamente el agitador con precaución y realizar movimientos manuales durante 30 segundos, en este instante se aplica una vez más la mínima energía mecánica que proporciona el equipo durante 2 minutos

15. Dejar temperar al ambiente la emulsión asfáltica nanomodificada para ensayos y aplicaciones posteriores

5.3 Caracterización de emulsión asfáltica modificada con nanosilanos

5.3.1 Caracterización emulsiones catiónicas modificadas con diferente modificador

En esta sección se hizo énfasis en analizar el efecto del agente modificador en el ligante residual trabajando con una emulsión comercial. Esto se pudo ver reflejado en la similitud de los valores que corresponden al residuo y aceite destilado (ver tabla 10), indicando la consistencia en la fabricación y revelando que cualquier cambio en las propiedades correspondió directamente al modificador.

Los resultados de la tabla 10 muestran que el modificador ZycoTherm mejoró la susceptibilidad térmica del ligante, reflejado en un mayor punto de ablandamiento y una menor penetración. Además, mostró una mayor viscosidad a 60°C, lo que indica mayor rigidez a esa temperatura. Por el contrario, NanoTac generó un ligante más blando, con menor viscosidad y mayor solubilidad, lo cual puede ser favorable para mejorar la cobertura y la adherencia al agregado.

Ambos modificadores mantuvieron valores similares en la prueba de envejecimiento, lo que sugiere que no afectan significativamente la estabilidad térmica del ligante. Dado que NanoTac produce una menor viscosidad y mayor facilidad de aplicación, se optó por emplearlo en las formulaciones posteriores.

Tabla 10

Caracterización de emulsiones catiónicas

Ensayos sobre emulsión	Unidad	NME 0,75% ZycoTherm	NME 0,75% NanoTac
------------------------	--------	------------------------	----------------------

Destilación	% Residuo	62,6	62,3
	% Aceite destilado	36,2	37
Sobre el ligante residual			
Ensayo	Unidad	0,75% ZycTherm	0,75% NanoTac
Penetración a 25°C (100 g, 5 seg)	0,1 mm	64	66
Punto de ablandamiento	°C	50,6	46,8
Solubilidad en tricloroetileno	%	98,8	99,3
Viscosidad a 60°C	Pa · s	367,5	256,5
Viscosidad a 135°C	Pa · s	0,39	0,36
Pérdida de masa – RTFO	%	0,2	0,2
Insolubles en heptano	%	16,3	15,3

Nota. NME (Nano Modified Emulsion)

5.3.1.1 Propiedades reológicas. En la tabla 11, se identifica una clara dependencia térmica de las propiedades reológicas sin tener en cuenta el agente modificador, ya que es evidente la disminución del módulo complejo y el aumento en el ángulo de fase, lo que se puede relacionar con un comportamiento más viscoso conforme aumenta la temperatura, relacionado a una menor rigidez. Se observa también, el parámetro de $\frac{G^*}{\text{Sen}(\theta)}$ únicamente se cumple a una temperatura de 70°C indicando que el material presentará fallas por deformaciones por encima de esta temperatura, a excepción de la muestra modificada con NanoTac, la cual se encuentra en el límite y no cumple la condición en el envejecimiento.

El aumento en la rigidez observado tras el envejecimiento se atribuye a la oxidación del ligante y la pérdida de compuestos volátiles (Castellanos & Chaves, 2020; García, 2013). Específicamente la ZycTherm presenta un mejor y mayor comportamiento en términos de resistencia a las deformaciones respecto a la NanoTac, presenta un comportamiento más elástico según su ángulo de fase y más rígido por el valor del módulo complejo, haciéndolo menos

propenso a deformación permanente ya que se recuperará más ante las deformaciones, lo cual es causa de la interrelación de los componentes y se vincula con la interacción entre las cargas presentes en el nanomaterial y el surfactante.

Tabla 11

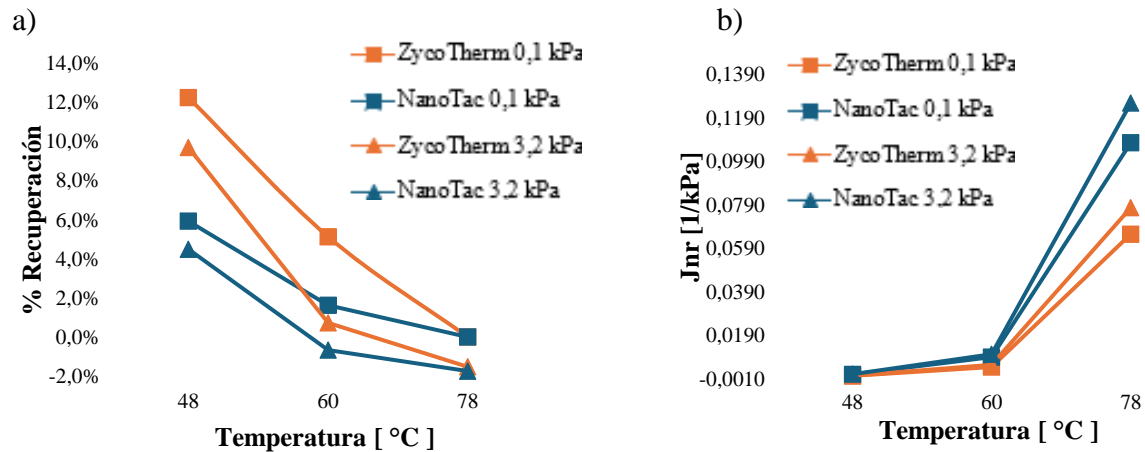
Propiedades reológicas ligante residual de emulsiones catiónicas nanomodificadas

Temperatura [°C]	0,75 % Nanotac			0,75 % Zycotherm		
	Ángulo de fase Θ [°]	G^* [kPa]	$\frac{G^*}{\text{Sen}(\Theta)}$	Ángulo de fase Θ [°]	G^* [kPa]	$\frac{G^*}{\text{Sen}(\Theta)}$
70	85,7	1,01	1,0	83,1	1,57	1,6
76	87,0	0,50	0,5	84,9	0,77	0,8
82	87,9	0,26	0,3	86,3	0,39	0,4
Envejecido						
70	81,9	2,06	2,1	78,9	3,27	3,3
76	84,0	0,99	1,0	81,7	1,58	1,6
82	85,7	0,50	0,5	83,9	0,78	0,8

Por otra parte, las características reológicas obtenidas en el ensayo MSCR reflejan una menor vulnerabilidad a esfuerzos bajos y altos para el componente Zycotherm, así como una menor rigidez a temperaturas elevadas. Su mayor porcentaje de recuperación (ver Figura 9a) y menor valor de J_{nr} (ver Figura 9b) indican una mayor capacidad de recuperarse y la disminución de presentar problemas por ahuellamiento, tanto para materiales originales como para envejecidos (ver Figura 10a y 10b). Dicho esto, resulta relevante destacar la compatibilidad molecular, ya que la mejora comparativa entre nanocompuestos es consecuente directamente de la naturaleza y composición de estos, resultando beneficioso para el desempeño del material la presencia de alcoholes aromáticos que interaccionan eficazmente para crear una estructura más compacta en presencia de enlaces siloxano.

Figura 9

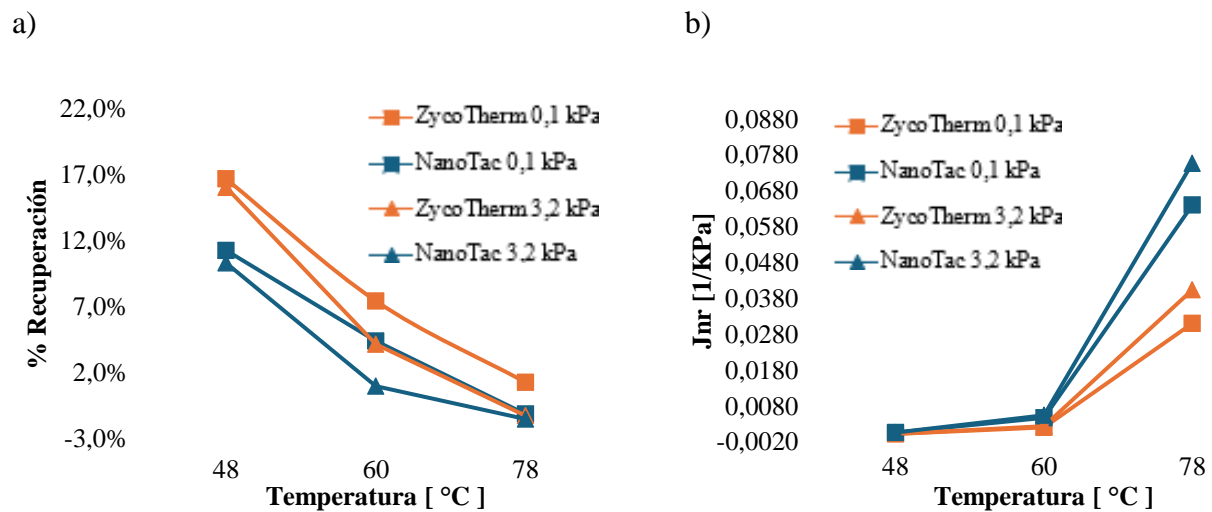
Resultados ensayo MSCR ligante residual de emulsiones catiónicas



Nota. a) Porcentaje de recuperación a diferentes temperaturas y tensiones. b) Valor de fluencia no recuperable a diferentes temperaturas y tensiones

Figura 10

Resultados ensayo MSCR ligante residual envejecido de emulsiones catiónicas



Nota. Porcentaje de recuperación con envejecimiento. b) Valor de fluencia no recuperable con envejecimiento

5.3.2 Caracterización de emulsiones aniónicas modificadas con NanoTac

En la tabla 12 se presentan todos los parámetros evaluados para las emulsiones formuladas, se observa que los resultados obtenidos para la prueba de estabilidad no resultan del todo representativos debido a que los nanosilanos en general actúan como un segundo tensioactivo

recubriendo la partícula, reduciendo su tamaño y disminuyendo aún más la tensión interfacial entre fases, evitando la coalescencia y mejorando su estabilidad (Riaza et al., 2014).

Tabla 12

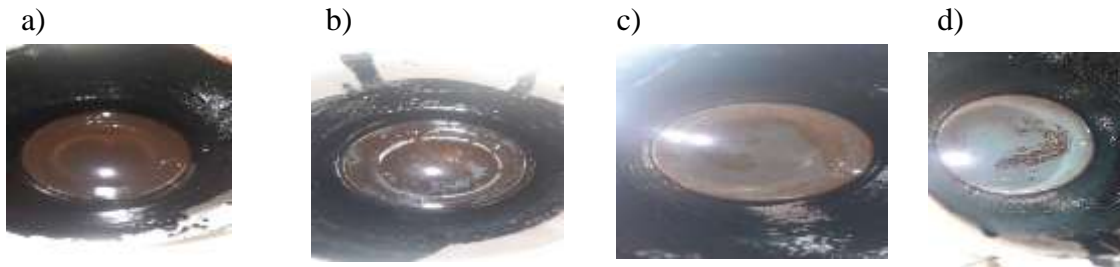
Caracterización fisicoquímica de emulsiones aniónicas nanomodificadas

Ensayos sobre emulsión	Modificación %	0,2		0,75		1,0	
	Surfactante%	0,5	1	0,5	1	0,5	1
Destilación	% Residuo	60,9	62,2	59,5	62,3	62,0	62,8
	% Aceite destilado	38,6	36,4	39,7	36,8	37,3	37,2
Estabilidad	24 horas, %	1	41	9	3	7	2
	5 días, %	14	50	44	11	39	16
Tamizado	% Retenido	0,2	-	-	0,4	-	-
Ensayos ligante residual							
Unidad							
Penetración a 25°C (100 g, 5 seg)	0,1 mm	68	62	75	66	71	69
Punto de ablandamiento	°C	48,2	49,4	46,9	48,4	47,1	47,9
Solubilidad en tricloroetileno	%	99,6	99,9	99,9	99,4	99,5	99,6
Viscosidad a 60°C	Pa · s	388,3	471,9	426,7	396,7	343,2	382,3
Viscosidad a 135°C	Pa · s	0,44	0,46	0,42	0,44	0,40	0,44
Pérdida de masa – RTFO	%	0,3	0,23	0,2	0,31	0,4	0,34
Insolubles en heptano	%	15,5	15,3	14,6	15,4	14,5	15,5

Se decidió realizar la caracterización para las emulsiones de únicamente aquellas modificadas con 0,2% y 0,75% de NanoTac, con 0,5% y 1% de surfactante, que llamaremos A y B respectivamente, porque presentaron un aspecto más homogéneo tal como se evidencia en la figura 11.

Figura 11

Emulsiones aniónicas nanomodificadas

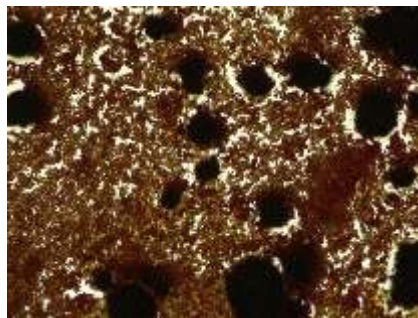


Nota. Aspecto visual de emulsiones aniónicas formuladas a) 0,75% Nano-1% Surfactante. b) 1% Nano-1% Surfactante. c) 0,2% Nano-0,5% Surfactante d) 0,75% Nano-0,5% Surfactante.

Además, se hizo un análisis microscópico (ver Figura 12) en donde el bajo contraste presentado por la refracción similar entre las fases dificultó el análisis.

Figura 12

Imagen microscópica de emulsión nanomodificada



Es de resaltar que a las emulsiones se les practicó la prueba de la gota, identificando que resultaban directas. En este sentido, el porcentaje retenido de la emulsión A resultó ser menor, lo que se atribuye a una menor aglomeración de partículas de asfalto teniendo en cuenta la perspectiva en la estabilidad a 24 horas y de igual forma por presentar una menor cantidad de asfalto disperso que es evidente comparando con el residuo presente en la emulsión B y demás emulsiones. En

general, se evidencia que la nano al ser líquida influye en el valor del residuo asfáltico, así como también la presencia de surfactante demostrando una integración y posible reestructuración que se adaptan a diferentes propiedades (Biradarpatil & Jaya, 2017; Taylor & Willis, 2012).

Ahora bien, al evaluar el efecto de la modificación en el ligante residual, se logra visualizar un leve pero consistente incremento en el punto de ablandamiento comparando con el asfalto base (47°C), sugiriendo un superior comportamiento en la susceptibilidad térmica del material (Chen & Li, 2021).

La mayoría de estudios se centran en la modificación de asfalto en lugar de emulsiones nanomodificadas, en ellos se evidencia un cambio en la penetración, para este caso en específico no, lo que lleva a presentar una ventaja al mantener el equilibrio entre flexibilidad y resistencia (Zhu et al., 2023). Por otra parte, la adición de nanosilanos contribuye significativamente a la resistencia a fluir, generada por el efecto de las interacciones químicas entre los grupos reactivos del silano y las partículas asfálticas, así como los componentes inherentes al surfactante, pues la alta viscosidad es consecuencia de la mayor presencia de enlaces de hidrógeno y de la susceptibilidad térmica de la nano, así mismo la subsistente presencia de surfactante puede crear una estructura o red coloidal reticulada más resiliente y mejorada (Kumar et al., 2024; Lindén, 2012). De la misma manera, la modificación contribuye a una menor afectación al envejecimiento y corrobora los cambios en las fuerzas intermoleculares de la estructura del aglutinante (Nazari et al., 2018). Y esto, se correlaciona con la diferencia observada en el contenido de asfáltenos pues son catalogados como la fracción más vulnerable al envejecimiento (García, 2013).

Los resultados presentados en las figuras 13 y 14 ilustran la particularidad viscoelástica del ligante y su sensibilidad con la temperatura. Con respecto al ligante de control, todas las muestras modificadas presentaron mejoras en su módulo complejo y ángulo de fase, con un aumento y una

disminución respectivamente. La emulsificación y posterior modificación permiten que las moléculas de silano se incorporen a las partículas de asfalto mediante procesos de hidrólisis y condensación realizando una reconfiguración en su estructura que refuerza la matriz asfáltica (Afshin & Behnood, 2025; G. J. Jordaan & Steyn, 2022, 2021d). Esto se ve reflejado en el cumplimiento en el parámetro ($G^*/\sin(\Theta)$) para una temperatura específica de 70°C y el aumento a diferentes temperaturas. Lo anterior indica que el material modificado presenta una mejora en el comportamiento elástico que se traduce en una mayor resistencia a la deformación permanente y fatiga.

Figura 13

Propiedades reológicas ligante residual de emulsión aniónica con 0,5% de surfactante

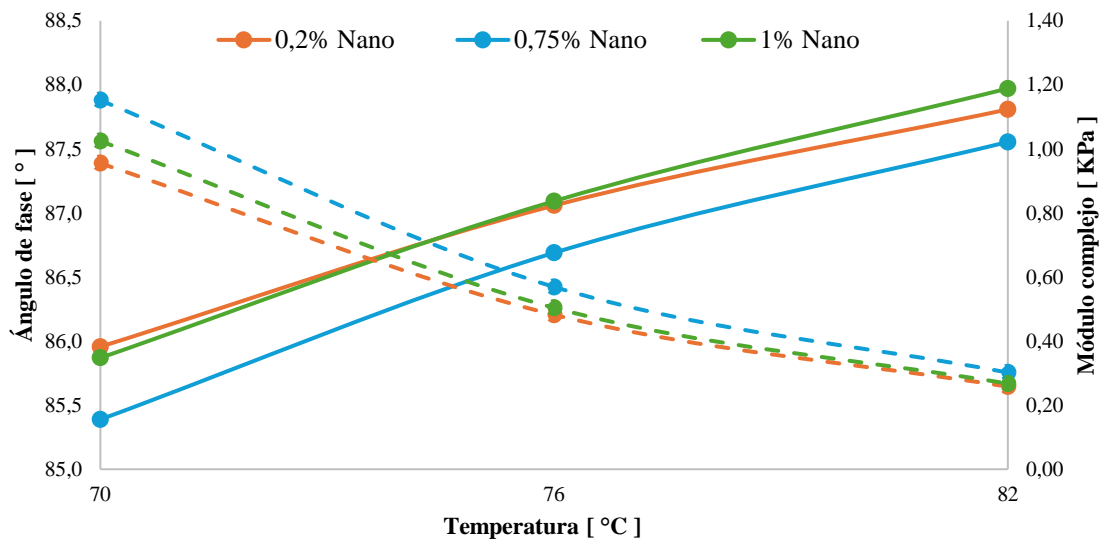
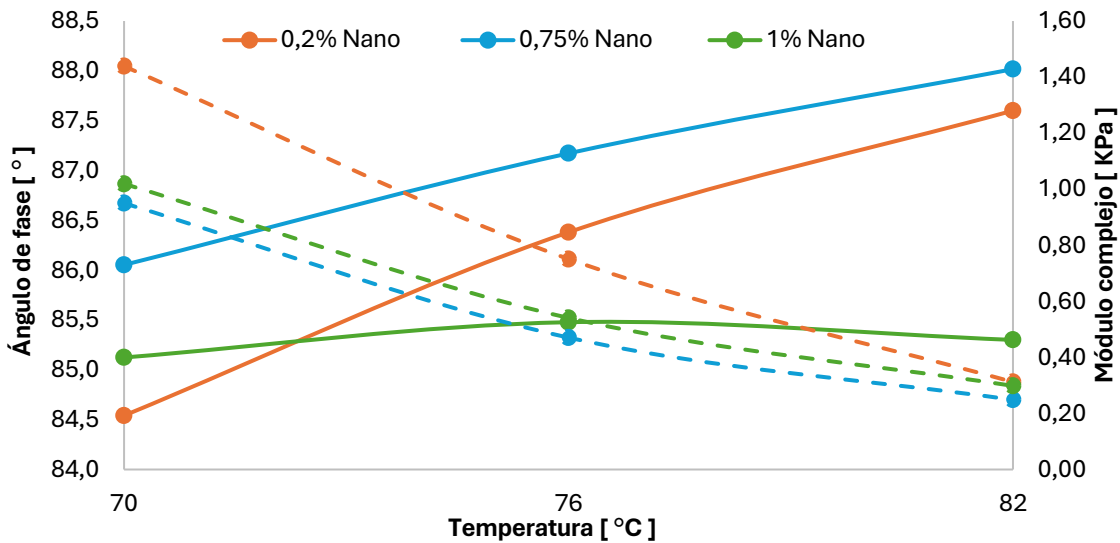


Figura 14

Propiedades reológicas ligante residual de emulsión aniónica con 1% de surfactante



Además, en las figuras se presenta la evolución del módulo complejo y el ángulo de fase en función de la temperatura para las emulsiones con 0,5% y 1% de surfactante, respectivamente. Se observa que, con el aumento de temperatura, ambos parámetros siguen la tendencia típica de los ligantes viscoelásticos, disminuye la rigidez y aumenta el carácter viscoso. Lo anterior se cumple para el material envejecido.

Tabla 13

Resultados ensayo MSCR para ligantes de emulsiones aniónicas

Nano Tac %	Tenso activo %	Temperatura [°C]	Tensión aplicada [KPa]	Recuperación %		Jnr [1/KPa]	
				0,1	3,2	0,1	3,2
0,2	0,5	48	0,1	4,6	3,4	0,0021	0,0022
	1		0,1	6,7	4,4	0,0014	0,0016
	0,5	60	0,1	0,9	0	0,0139	0,0158
	1		0,1	2,0	0	0,0091	0,0106

	0,5		0	0	0,1426	0,1719
	1	78	0	0	0,1057	0,1282
	0,5		5,2	3,3	0,0017	0,0018
	1	48	5,5	3,6	0,0019	0,0021
0,75	0,5		1,5	0	0,0115	0,0134
	1	60	1,9	0	0,0120	0,0143
	0,5		0	0	0,1238	0,1493
	1	78	0	0	0,1232	0,1543
	0,5		4,5	3,0	0,0020	0,0021
	1	48	4,7	3,4	0,0019	0,0021
1,0	0,5		0,9	0	0,0130	0,0149
	1	60	2,2	0	0,0123	0,0150
	0,5		0	0	0,1386	0,1623
	1	78	0	0	0,1347	0,1671

Específicamente al comparar la influencia del surfactante en las propiedades reológicas, es apreciable observar un comportamiento más elástico y resistente en emulsiones catiónicas, sin embargo, al sufrir el proceso de envejecimiento dichos atributos se ven condicionados, resultando en menores capacidades de recuperación y resistencia, lo que revela el impacto de la interacción entre las partículas de ligante y los nanosilanos, sugiriendo que el surfactante aniónico blindo en gran medida la matriz asfáltica contra la oxidación y volatilización de componentes. En este sentido, la evaluación de la concentración de surfactante y modificador es importante, por lo cual resulta válido afirmar que la concentración de surfactante favorece la dispersión y reactividad de la nano sobre las partículas asfálticas, ya que se presenta una mayor efectividad a concentraciones superiores de surfactante, y está relacionado con el tamaño de gota de la partícula, ya que a menor tamaño se presentara una mayor área superficial.

En resumen, la combinación de una concentración moderada o mínima de nanosilanos, y una alta proporción de surfactante promueve un mejor desempeño reológico del ligante, tanto en condiciones normales como de envejecimiento. Esto se debe a una mayor interacción entre las partículas del nanocompuesto y la matriz asfáltica, favoreciendo la formación de una red coloidal

más estable y elástica. No obstante, una concentración excesiva de nanosilanos puede inducir efecto de saturación y aglomeración, disminuyendo la eficiencia de la modificación (Özdemir, 2021).

6. Conclusiones

La tecnología de emulsiones nanomodificadas representa una alternativa prometedora desde el punto de vista ingenieril, ambiental y económico. En este estudio se logró establecer que la formulación de dichas emulsiones depende significativamente de múltiples variables, tales como composición y proporciones de los componentes, el método y la intensidad de agitación, así como las condiciones térmicas y de dosificación durante el proceso. Estos factores inciden directamente en la homogenización de fases, estabilidad y desempeño de la emulsión obtenida. La caracterización fisicoquímica y reológica permitió determinar el efecto de la modificación con nanosilanos organofuncionales sobre el ligante residual. En particular, fue clave la identificación del comportamiento frente al envejecimiento, la deformación permanente y la susceptibilidad térmica. Se evidenció que el uso de NanoTac como agente modificador, ofrece mejoras notables en las propiedades elásticas del ligante, incrementando su capacidad de recuperación frente a esfuerzos y reduciendo su vulnerabilidad al ahuellamiento a elevadas temperaturas.

A partir de los resultados experimentales se definió una metodología eficiente que prioriza la emulsificación previa a la modificación, debido a la reacción química entre los grupos funcionales del silano y el surfactante aniónico (ácido sulfónico), la cual podría generar agregación o gelificación del sistema. También, el ajuste preciso de variables como temperaturas, secuencia de adición y tiempos de agitación fue fundamental para evitar la separación de fases y favorecer una emulsión homogénea y estable. Los hallazgos demuestran que existe una relación entre los

nanosilanos y el surfactante por interactuar con las partículas de asfalto, lo cual puede disminuir la eficiencia de estabilizar y afectar la estructura del material residual. Por tanto, se concluye que se debe establecer un equilibrio óptimo entre la concentración del modificador y del surfactante para maximizar la estabilidad y reestructuración coloidal sin comprometer la interacción entre fases.

A pesar de algunas incompatibilidades observadas en determinadas condiciones del sistema, la modificación con nanosilanos mostró una influencia positiva general sobre el comportamiento del ligante. Esta tecnología no solo mejora la resistencia a las deformaciones permanentes y la elasticidad del material, sino que también sugiere un incremento en las fuerzas de unión internas. Esto último es clave para la aplicación de estas emulsiones en mezclas con agregados marginales, favoreciendo su uso en estructuras de pavimento para vías terciarias.

Referencias bibliográficas

- Abd El-Rahman, A. M. M., El-Shafie, M., Abo-Shanab, Z. L., & El-Kholy, S. A. (2017). Modifying asphalt emulsion with different types of polymers for surface treatment applications. *Petroleum Science and Technology*, 35(14), 1473–1480. <https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1344709>
- Abdullin, A., & Emelyanycheva, E. (2020). WATER-BITUMEN EMULSIONS BASED ON SURFACTANTS OF VARIOUS TYPES. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 55(1).
- Acevedo, S., Gutierrez, X., & Rivas, H. (2001). Bitumen-in-Water Emulsions Stabilized with Natural Surfactants. *Journal of Colloid and Interface Science*, 242(1), 230–238. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.7728>
- Ácido Sulfónico Lineal. (n.d.). ECOQUIM.
- Adams, J. J. (2014). Asphaltene Adsorption, a Literature Review. *Energy & Fuels*, 28(5), 2831–2856. <https://doi.org/10.1021/ef500282p>
- Adwani, D., Kumar, P., Sharma, A., & Naga, G. R. R. (2024). Comprehensive rheological and mechanistic evaluation of an asphalt binder and mixture modified with warm mix additives. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(39), 51633–51646. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34621-y>
- AEMA, & Asphalt Institute. (2008). *Basic Asphalt Emulsion Manual: Vol. MS-19* (4a ed.). Asphalt Institute.

- Afshin, A., & Behnood, A. (2025). Nanomaterials in Asphalt Pavements: A State-of-the-Art Review. *Cleaner Waste Systems*, 100214. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100214>
- Agudelo, J. (2022, August 30). *Vías Terciarias en Colombia: un reto para el desarrollo*. Grupo Bancolombia. <https://www.bancolombia.com/empresas/capital-inteligente/especiales/infraestructura-2022/vias-terciarias-en-colombia>
- Akhalwaya, I. (2022). *A CASE STUDY ON THE USE OF NANOORGANOSILANE MODIFIED EMULSIONS (NMEs) IN SOUTH AFRICA*.
- Alayon, M. (2004). *ASFALTENOS Ocurrencia y floculación*.
- Ali, I., Alothman, D., & Gokcekus, H. (2023). Rheological Performance of ZycoTherm/Nano-Silica Composite Modified Binders at High and Low Temperatures. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 34(2), 77–102. <https://doi.org/10.18400/tjce.1239171>
- Ali, M. F., & Alqam, M. H. (2000). The role of asphaltenes, resins and other solids in the stabilization of water in oil emulsions and its effects on oil production in Saudi oil fields. *Fuel*, 79(11), 1309–1316. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00268-9](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00268-9)
- Al-Sabagh, A. M. (2002). The relevance HLB of surfactants on the stability of asphalt emulsion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 204(1–3), 73–83. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)01115-3](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)01115-3)
- Anachkov, S. E., Tcholakova, S., Dimitrova, D. T., Denkov, N. D., Subrahmaniam, N., & Bhunia, P. (2015). Adsorption of linear alkyl benzene sulfonates on oil–water interface: Effects of Na⁺, Mg²⁺ and Ca²⁺ ions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 466, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.10.059>

- Aranberri, I., Binks, B. P., Clint, J. H., & Fletcher, P. D. (2009). Estabilidad de las emulsiones de Pickering utilizadas en la elaboración de productos agroquímicos. *Revista Iberoamericana de Polímero*, 10(1).
- Arenas, H. (2006). *Tecnología del cemento asfáltico*.
- Arshad, A. K., Kamal, M. I. A. M., Ahmad, J., Shaffie, E., Rais, N., Grover, S., & Guyot, X. (2024). *Characterization of Asphalt Emulsion with Different Percentage of Asphalt Content* (pp. 77–91). https://doi.org/10.1007/978-981-99-6018-7_6
- Binks, B. P., & Whitby, C. P. (2005). Nanoparticle silica-stabilised oil-in-water emulsions: improving emulsion stability. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 253(1–3), 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.10.116>
- Biradarpatil, A., & Jaya, R. (2017). Laboratory Studies on Cold Bituminous Mixes with NanoTac Additive and its Effect on Curing Time. *I-Manager's Journal on Civil Engineering*, 7(3), 41. <https://doi.org/10.26634/jce.7.3.13609>
- Björkegren, S., Nordstierna, L., Törnecrona, A., & Palmqvist, A. (2017). Hydrophilic and hydrophobic modifications of colloidal silica particles for Pickering emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 487, 250–257. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.10.031>
- Brinker, J., & Scherer, G. (1990). *SOL-GEL SCIENCE: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. Elsevier.
- Caballero, J., & Gonzalez, C. (2018). *ESTADO DEL ARTE DE LAS APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA EN EL RECOBRO MEJORADO*. Universidad Industrial de Santander .

- Castellanos, W., & Chaves, S. (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), 7–23. <https://doi.org/10.14483/2322939X.16227>
- Castro, W., Rondón, H., & Barrero, J. (2016). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. *Ingeniería*, 21(1). *Cemento Asfáltico 60/70*. (n.d.). Pro-Road.
- Chen, Z., & Li, Z. (2021). Preparation and stabilisation mechanism of asphalt-in-water Pickering emulsion stabilised by SiO₂ nanoparticles. *Road Materials and Pavement Design*, 22(7), 1679–1691. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1708431>
- Chilukwa, N. N., & Mostafa, M. M. H. (2023). An investigation of the efficacy of nanoemulsions as alternative treatment for a marginal quality pavement material. *Road Materials and Pavement Design*, 25(9), 2071–2084. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2297717>
- Cifuentes, A. (2019). Formulación y desarrollo de una emulsión de tipo pickering para su uso en técnicas de recobro mejorado de petróleo. In *Universidad de los Andes*. Universidad de los Andes.
- Dash, S. S., Chandrappa, A. K., & Sahoo, U. C. (2022). Design and performance of cold mix asphalt – A review. *Construction and Building Materials*, 315, 125687. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125687>
- Davidson, K. (1995). *INTRODUCTION TO ASPHALT EMULSIONS*.

- Dhriyan, S. S., & Garg, Y. (2017). Use of Bitumen Emulsion for Flexible Road Construction. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 7(02), 82–85. <https://doi.org/10.9790/9622-0702038285>
- Elizondo, F., Salazar, J., & Villegas, E. (2010). Caracterización de asfaltos modificados con diferentes aditivos . *Ingeniería. Revista de La Universidad de Costa Rica*, 20(1–2).
- Ficha Técnica Emulsiones Asfálticas. (n.d.). In *Humberto Quintero*. www.humbertoquintero.com.
- García, W. (2013). *Estudio de la Influencia del Asfalto Envejecido en el Comportamiento Mecánico de una Mezcla de Concreto Asfáltico Producida en Caliente*. Universidad Nacional de Colombia.
- Gómez, A. (2014). *Formulación y caracterización de nano-emulsiones de aceite de parafina tipo agua-en-aceite (W/O)*. CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS .
- Guo, W., Guo, X., Chang, M., & Dai, W. (2018). Evaluating the Effect of Hydrophobic Nanosilica on the Viscoelasticity Property of Asphalt and Asphalt Mixture. *Materials*, 11(11), 2328. <https://doi.org/10.3390/ma11112328>
- Guo, W., Guo, X., Chen, W., Li, Y., Sun, M., & Dai, W. (2019). Laboratory Assessment of Deteriorating Performance of Nano Hydrophobic Silane Silica Modified Asphalt in Spring-Thaw Season. *Applied Sciences*, 9(11), 2305. <https://doi.org/10.3390/app9112305>
- Gutierrez, A., Rincon, H., Hernandez, J., & Benitez, R. (2002). *COMPOSICIÓN EMULSIFICANTE PARA PREPARAR EMULSIONES DE ASFALTO EN AGUA* (Patent WO 02/094939).

Gutierrez, A., Rincon, H., Ochoa, J., & Lopez, R. (2002). *Composición emulsificante para preparar emulsiones de asfalto en agua* (Patent WO 02/094939).

Instituto Nacional de Vías - INVIAS. (2022). *SECCIONES 700 Y 800-MATERIALES Y MEZCLAS ASFÁLTICAS Y PROSPECCIÓN DE PAVIMENTOS*.

Jain, R., & Dwivedi, S. (2018). Influence of Zycosil in Cold Mix design of SDBC. *–International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 4(10).

Jordaan, G. J., & Steyn, W. J. V. (2021a). Engineering properties of new-age (Nano) modified emulsion (nme) stabilised naturally available granular road pavement materials explained using basic chemistry. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(20).
<https://doi.org/10.3390/app11209699>

Jordaan, G. J., & Steyn, W. J. V. (2021c). Fundamental principles ensuring successful implementation of new-age (Nano) modified emulsions (nme) for the stabilisation of naturally available materials in pavement engineering. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(4), 1–19. <https://doi.org/10.3390/app11041745>

Jordaan, G. J., & Steyn, W. J. V. (2022). Practical Application of Nanotechnology Solutions in Pavement Engineering: Construction Practices Successfully Implemented on Roads (Highways to Local Access Roads) Using Marginal Granular Materials Stabilised with New-Age (Nano) Modified Emulsions (NME). *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(3).
<https://doi.org/10.3390/app12031332>

Jordaan, G. J., & Steyn, W. J. vdM. (2021d). Nanotechnology Incorporation into Road Pavement Design Based on Scientific Principles of Materials Chemistry and Engineering Physics Using

New-Age (Nano) Modified Emulsion (NME) Stabilisation/Enhancement of Granular Materials. *Applied Sciences*, 11(18), 8525. <https://doi.org/10.3390/app11188525>

Jordaan, G., Kilian, M. A., Muthivelli, M. N., & Dlamini, D. (2017, May). *PRACTICAL APPLICATION OF NANO-TECHNOLOGY IN ROADS IN SOUTHERN AFRICA*.

Jordaan, G., Modise, T., Murphy, M., & Dryburgh, R. C. L. (n.d.). *The influence of the characteristics of emulsifying agents on the stabilisation of granular materials using nano-silane modified bitumen emulsions*. <https://www.researchgate.net/publication/336614749>

Jordaan, G., & Steyn, W. (2019). *Testing of granular/soil characteristics for the optimisation of pavement designs using reactive agents including “ new-age” nano-technologies*. ResearchGate.

Kumar, S., Kumar, A., Gautam, S., & Verma, A. (2024). Emulsification of Indian heavy crude oil and analysis of flow characteristics using computational fluid dynamics (CFD) for pipeline transportation. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 45(11), 2166–2179. <https://doi.org/10.1080/01932691.2023.2256384>

Kupikowska-Stobba, B., Domagała, J., & Kasprzak, M. M. (2024). Critical Review of Techniques for Food Emulsion Characterization. *Applied Sciences*, 14(3), 1069. <https://doi.org/10.3390/app14031069>

Lendínez, C. (2015). *Estudio de emulsiones altamente concentradas de tipo W/O: relación entre tamaño de gota y propiedades*. Universitat de Barcelona.

- Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1–2), 42–82. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011>
- Li, D. D., & Greenfield, M. L. (2014). Chemical compositions of improved model asphalt systems for molecular simulations. *Fuel*, 115, 347–356. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.012>
- Liang, C. (2010). *Cationic and Anionic Carbon Dioxide Responsive Switchable Surfactants*. Queen's University.
- Lindén, J. (2012). *Surface modified silica nanoparticles as emulsifier*. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- Lindner, M., Bäumlner, M., & Stäbler, A. (2018). Inter-Correlation among the Hydrophilic–Lipophilic Balance, Surfactant System, Viscosity, Particle Size, and Stability of Candelilla Wax-Based Dispersions. *Coatings*, 8(12), 469. <https://doi.org/10.3390/coatings8120469>
- Lira-Galeana, C., & Hammami, A. (2000). *Chapter 21 Wax Precipitation from Petroleum Fluids: A Review* (pp. 557–608). [https://doi.org/10.1016/S0376-7361\(09\)70292-4](https://doi.org/10.1016/S0376-7361(09)70292-4)
- Manjarrés, S. (2023). *Caracterización de un Asfalto Colombiano Modificado con Polímeros y Evaluación del Efecto en sus Propiedades Reológicas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Marquez, R., Forgiarini, A., & Bullon, J. (2007). *EMULSIONES PARENTERALES*.
- Matos, M., Luque, S., & Gutiérrez, G. (2020). *Formulación y estabilidad de emulsiones para encapsulación de biocompuestos* (Vol. 116, Issue 2). www.rseq.org
- McCoy, P., & Smith, G. (1949). *BITUMINOUS EMULSIONS AND THE LIKE* (Patent 2481323).

- Meng, Y., Chen, J., Kong, W., & Hu, Y. (2023). Review of emulsified asphalt modification mechanisms and performance influencing factors. *Journal of Road Engineering*, 3(2), 141–155. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2023.01.006>
- Mercado, R., Bracho, C., & Avendaño, J. (2008). *EMULSIONES ASFALTICAS USOS-ROMPIMIENTO*.
- Mercado, R., & Fuentes, L. (2016). Asphalt emulsions formulation: State-of-the-art and dependency of formulation on emulsions properties. *Construction and Building Materials*, 123, 162–173. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.129>
- Mezger, T. (2018). *Reología Aplicada*. Anton Paar GmbH.
- Mirabdolazimi, S. M., Pakenari, M. M., & Kargari, A. (2021). Effect of Nanosilica on Moisture Susceptibility of Asphalt Emulsion Mixture. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(11), 11139–11151. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05696-3>
- Miró, R., Martínez, A. H., Moreno-Navarro, F., & del Carmen Rubio-Gámez, M. (2015). Effect of ageing and temperature on the fatigue behaviour of bitumens. *Materials & Design*, 86, 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.076>
- Montgomerie, J. (1927). *BITUMINUOS EMULSION* (Patent 1,643,675). UNITED STATES PATENT OFFICE.
- NanoTac*. (n.d.). Zydex.
- Nazari, H., Naderi, K., & Moghadas Nejad, F. (2018). Improving aging resistance and fatigue performance of asphalt binders using inorganic nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 170, 591–602. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.107>

Organización de las Naciones Unidas. (n.d.). *OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE*.

Özdemir, D. (2021). High and low temperature rheological characteristics of linear alkyl benzene sulfonic acid modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 301, 124041. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124041>

Özdemir, D. (2023). Antiaging Effects of Linear Alkyl Benzene Sulfonic Acid Utilization on Bitumen Modification. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004606](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004606)

Pablo Aguiar Moya, J., Leiva Padilla, P., Ernesto Villegas Villegas, R., Guillermo Loria Salazar, L., Zúñiga Araya, C., & de Costa Rica, U. (2018). *Módulo de los componentes del asfalto: asfaltenos y maltenos*.

Peng, Y., Miao, J., Yu, X., Yang, Y., Yang, Q., Kong, L., Wang, W., Chen, Y., Liang, F., & Ao, T. (2024). The effect of anionic emulsifiers' diversity and manufacturing processes on the stability and mechanical properties of the water-based epoxy-emulsified asphalt. *Scientific Reports*, 14(1), 22268. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73009-3>

Pérez, G. (2020). *Caminos rurales: vías claves para la producción, la conectividad y el desarrollo territorial*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/45781-caminos-rurales-vias-claves-la-produccion-la-conectividad-desarrollo-territorial>

Petersen, J. C. (2000). *Chapter 14 Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability* (pp. 363–399). [https://doi.org/10.1016/S0376-7361\(09\)70285-7](https://doi.org/10.1016/S0376-7361(09)70285-7)

- Porto, M., Caputo, P., Abe, A. A., Loise, V., & Oliviero Rossi, C. (2021). Stability of bituminous emulsion induced by waste based bio-surfactant. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/app11073280>
- Puerto, D. (2019). *Efecto de la nanoslice sobre las propiedades reológicas de la matriz cementante y su influencia en el estado endurecido del concreto hidráulico*. Universidad Nacional de Colombia.
- Querol, N. (2018). *Estudio experimental sobre el proceso de diseño, formulación y fabricación en fase inversa de emulsiones concentradas monomodales y bimodales de betún en agua*. Universidad de Lleida.
- Querol, N., Barreneche, C., & Cabeza, L. F. (2017). Method for controlling mean droplet size in the manufacture of phase inversion bituminous emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 527, 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.05.018>
- Querol, N., Barreneche, C., & Cabeza, L. F. (2019). Asphalt emulsion formulation: State of the art of formulation, properties and results of HIPR emulsions. *Construction and Building Materials*, 212, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.301>
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The Shell Bitumen Handbook* (Fifth). Thomas Telford Publishing.
- Rendón, M., & Torres, E. (2018). *DISEÑO DE UNA EMULSION ASFALTICA MODIFICADA DE ALTO DESEMPEÑO PARA RIEGOS DE LIGA, EVALUANDO SU RESISTENCIA AL*

ESFUERZO DE CORTE Y LA ADHERENCIA ENTRE CAPAS DE PAVIMENTO.

Universidad del Cauca.

Repsol. (2014). *Emulsiones Modificadas*.

Riaza, S., Cortés, F. B., & Otalvaro, J. (2014). Emulsions with heavy crude oil in presence of nanoparticles. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 36, 55–68.

<https://doi.org/10.15446/rbct.n36.46282>

Rodríguez, R., Castaño, V., & Martínez, M. (2001). *Emulsiones Asfálticas*.

Rondón, H., Ruge, J., & Moreno, L. (2016). Efecto del agua sobre el asfalto y su posible influencia en el daño por humedad en una mezcla asfáltica porosa. *Revista Chilena de Ingeniería*, 24(4).

Rubiños, S. (2024, January 12). Las vías terciarias en Colombia: a la espera de que se ejecuten proyectos. *Periódico UNAL*.

Rust, F. C., Smit, M. A., Akhalwaya, I., Jordaan, G. J., & du Plessis, L. (2022). Evaluation of two nano-silane-modified emulsion stabilised pavements using accelerated pavement testing.

International Journal of Pavement Engineering, 23(5), 1339–1352.

<https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1799210>

Saboo, N., & Kumar, P. (2015). A study on creep and recovery behavior of asphalt binders.

Construction and Building Materials, 96, 632–640.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.078>

Salager, J.-L. (2002). *SURFACTANTES Tipos y Usos*.

Salomon, D. (2006). *Asphalt Emulsion Technology*.

Sandoval, I., & Cremades, I. (n.d.). *CARACTERIZACIÓN DE ASFALTOS MEDIANTE CREEP REPETIDO MULTI-ESFUERZO EN REOMETRO DE CORTE DINAMICO*.

Schwuger, J. (1984). Interfacial and Performance Properties of Sulfated Polyoxyethylenated Alcohols. In *Structure/Performance Relationships in Surfactants* (pp. 2–26). ACS Symposium Series.

Shanbara, H. K., Dulaimi, A., Al-Mansoori, T., Al-Busaltan, S., Herez, M., Sadique, M., & Abdel-Wahed, T. (2021). The future of eco-friendly cold mix asphalt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *149*, 111318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111318>

Taylor, J., & Willis, R. (2012). *EFFECTS OF NANOTAC ADDITIVE ON BOND STRENGTH AND MOISTURE RESISTANCE OF TACK COATS*.

Thives, L. P., & Ghisi, E. (2017). Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *72*, 473–484. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.087>

Tolosa, L. (2016). *EMULSIONES ESTABILIZADAS con PARTICULAS (Emulsiones de PICKERING)*.

Ulloa, A. (2012). *Preparación de emulsiones asfálticas en laboratorio*.

Vargas, E. (2023). *EMULSIONES ASFÁLTICAS CON ADICIÓN DE NANOSÍLICE*. Universidad EAFIT.

Velásquez, L., Montealegre, H., Parra, L., & Vera, F. (2020). Asfalto natural alternativa de mejoramiento, rehabilitación y construcción de la Infraestructura vial del Alto Magdalena Colombia. *Polo Del Conocimiento*, *5*(No. 05).

Wen, C. S., Chilingarian, G. V., & Fu Yen, T. (1978). *Chapter 7 Properties and Structure of Bitumens* (pp. 155–190). [https://doi.org/10.1016/S0376-7361\(08\)70066-9](https://doi.org/10.1016/S0376-7361(08)70066-9)

Yaacob, H., Hainin, Mohd. R., A. Aziz, Md. M., M. Warid, N., Chang, F.-L., Ismail, C. R., & Abdul Hassan, N. (2013). Bitumen Emulsion in Malaysia—A Conspectus. *Jurnal Teknologi*, 65(3). <https://doi.org/10.11113/jt.v65.2153>

Zapata, I. (2023). *FORMULACIÓN DE EMULSIONES ASFALTICAS PARA USO VIAL*. ResearchGate.

Zhou, X., Wang, Z., Guo, H., Yan, F., Liu, J., & Xu, X. (2024). A novel method for enhancing coating performance of emulsified asphalt mortar to RAP in cold recycled mixture. *Construction and Building Materials*, 411, 134315. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134315>

Zhu, Z., Fan, L., Wang, L., & Li, Y. (2023). *Performance Evaluation of Nano TiO₂/SBR Composite Modified Asphalt Emulsion and Its Micro-Surfacing Mixture*. <https://doi.org/10.3233/ATDE230774>

Zumba, A., & Quinga, M. (2022). *Caracterización de una mezcla asfáltica en frío usando emulsión convencional y una nano modificada con organosilanos de segunda generación*. Universidad Central del Ecuador.

ZycoTherm. (n.d.). All States Materials Group.

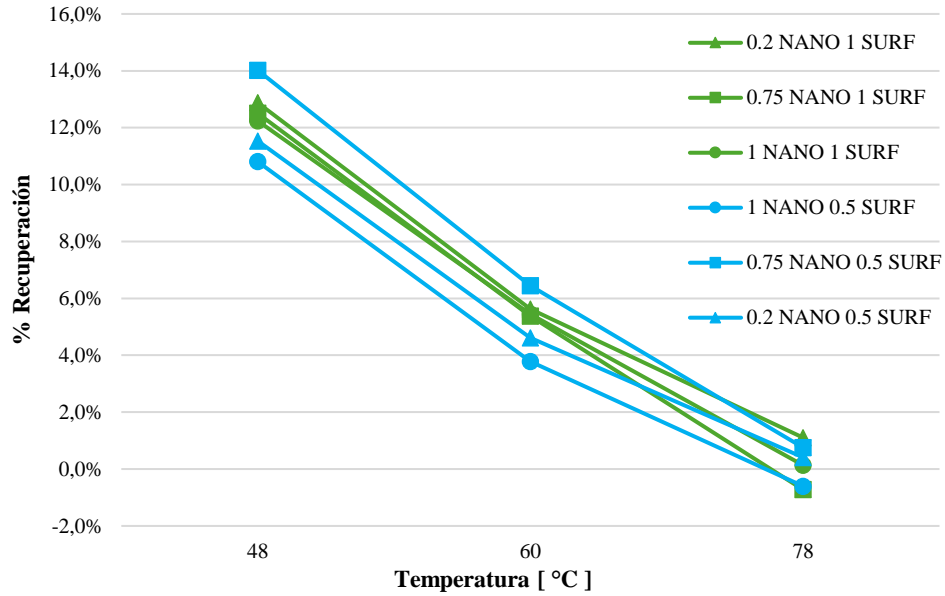
Zydex Industries. (2018a). *NANOTAC SDS*.

Zydex Industries. (2018b). *ZYCOTHERM SDS*.

Apéndices

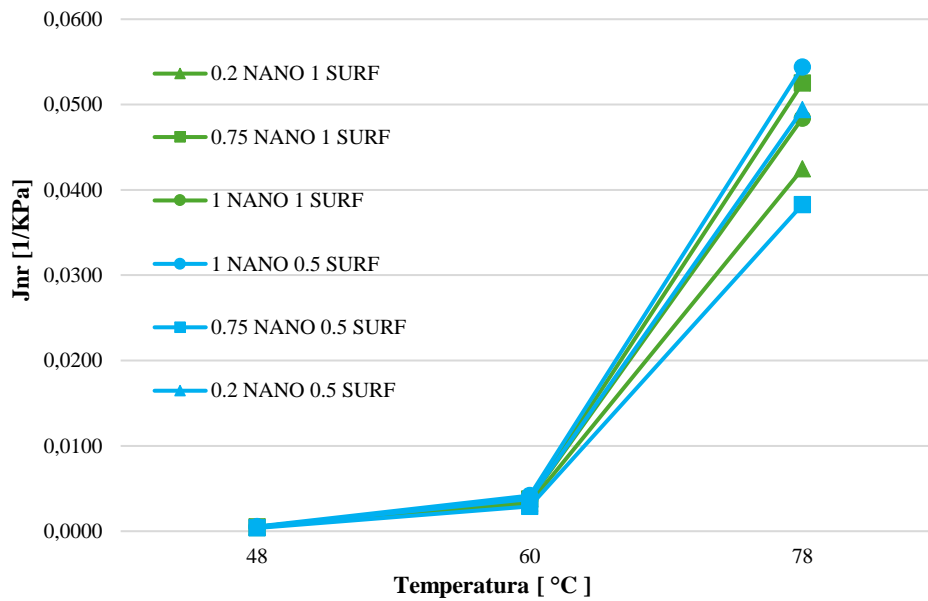
Apéndice A

Porcentaje de recuperación para ligantes residuales envejecidos a tensiones de 0,1 KPa



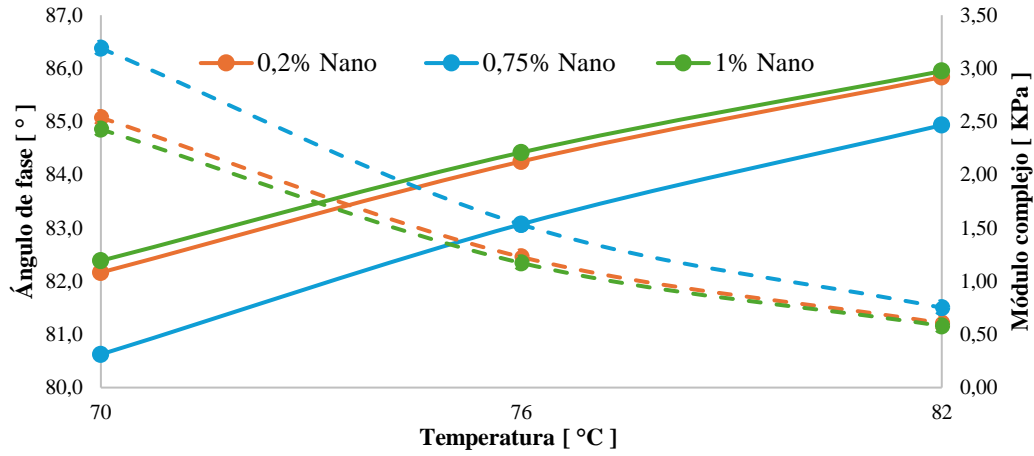
Apéndice B

Valor de fluencia no recuperable para ligantes residuales envejecidos a tensiones de 0,1 KPa



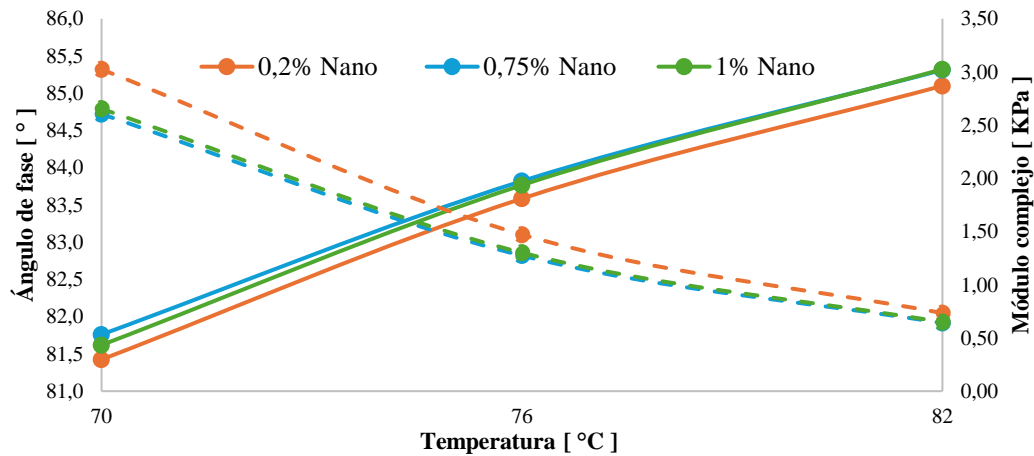
Apéndice C

Propiedades reológicas de ligante residual con 0,5 % de surfactante



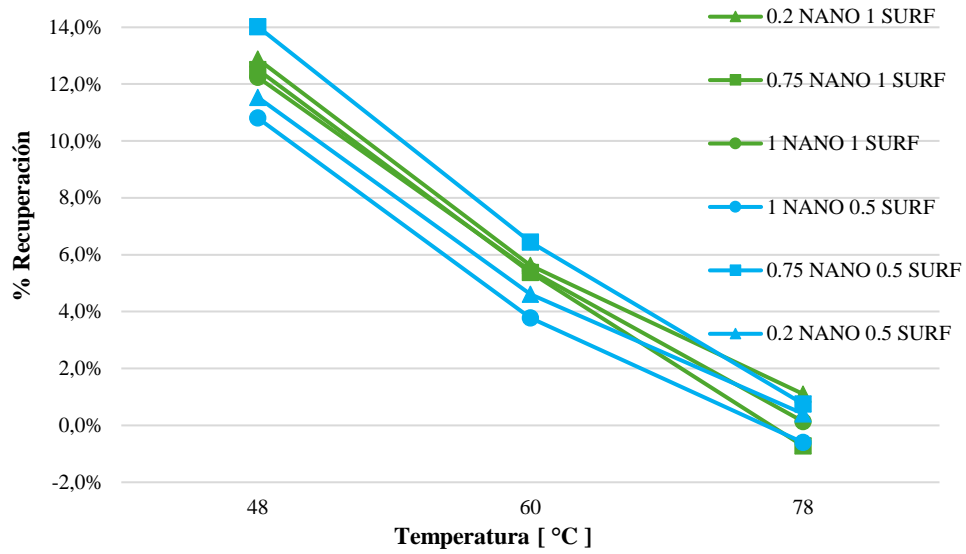
Apéndice D

Propiedades reológicas de ligante residual con 1% surfactante



Apéndice E

Porcentaje de recuperación para ligantes residuales envejecidos a tensiones de 3,2 KPa



Apéndice F

Valor de fluencia no recuperable para ligantes residuales envejecidos a tensiones de 3,2 KPa

