



BLADIMIR DE JESUS RODRÍGUEZ USECHE

Tesis de Grado

Asesor, docente
JULIAN VIDAL VALENCIA

UNIVERSIDAD EAFIT
Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería
Maestría en Ingeniería
Medellín
2025

COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO ELABORADA CON ARCILLA EXPANDIDA.

Bladimir de Jesús Rodríguez Useche

Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Maestría en Ingeniería, Universidad EAFIT,

Carrera 49 N° 7Sur -50, Medellín, Colombia

Correo electrónico: vrodrig@eafit.edu.co

Resumen: *La necesidad cada vez mayor de utilizar agregados alternativos que sustituyan los agregados pétreos naturales en la producción de mezclas asfálticas ha llevado a la industria de la construcción de carreteras a evaluar el comportamiento de nuevos materiales entre ellos se encuentran las arcillas expandidas. En esta investigación se evalúa el comportamiento físico y mecánico en el laboratorio de una mezcla asfáltica en frío (CMA) elaborada con arcilla expandida, a la cual se le reemplazó en su totalidad los agregados naturales por Arlita, (arcilla expandida), y se le midió la densidad bulk, el porcentaje de vacíos, la permeabilidad, la pérdida por abrasión, la tracción indirecta, el módulo resiliente, el módulo elástico y la deformación permanente. Se utilizó un método comparativo para analizar los resultados experimentales con las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías de la República de Colombia (INVIAS 2022); el documento también presenta los beneficios y las limitaciones de la mezcla asfáltica.*

Palabras Claves: *Agregados, mezcla asfáltica en frío, emulsión asfáltica, arcilla expandida, Arlita, módulo elástico, deformación permanente.*

Abstract: *The increasing need to use alternative aggregates to replace natural stone aggregates in the production of asphalt mixtures has led the road construction industry to evaluate the behavior of new materials, including expanded clays. This research evaluates the physical and mechanical behavior in the laboratory of a cold asphalt mixture (CMA) made with expanded clay, in which the natural aggregates were completely replaced by Arlita, expanded clay, and the bulk density, void percentage, permeability, abrasion loss, indirect traction, resilient modulus, elastic modulus and permanent deformation were measured. A comparative method was used to analyze the experimental results with the general specifications for road construction of the National Institute of Roads of the Republic of Colombia (INVIAS); the document also presents the benefits and limitations of the asphalt mixture.*

Keywords: *Aggregates, cold mix asphalt, asphalt emulsion, expanded clay, arlite, elastic modulus, permanent deformation.*

1. Introducción

Los diferentes tipos de mezclas asfálticas en frío (CMA) que están normalizadas como son las mezclas densas en frío (MDF), las mezclas abiertas en frío (MAF) y las mezclas de pavimento asfáltico reciclado en frío (RAP) son materiales utilizados en la construcción de los pavimentos flexibles; estas mezclas se componen de diferentes materiales como son los agregados pétreos, que se desempeñan como la fracción granular que resiste las cargas, el asfalto residual que es material bituminoso que actúa como material cementante que une las partículas del agregado[1]. Dependiendo del desempeño y la profundidad a utilizar en la capa de pavimentos se le asigna una denominación a la capa asfáltica como: rodadura la capa superior, intermedia la capa que está debajo de la capa de rodadura y base la capa que está debajo de la capa intermedia; en su elaboración las características de los materiales varían en cada capa, para el logro de un adecuado desempeño. Las mezclas asfálticas tienen mayor uso como capas de rodadura que están sometidas al efecto de las cargas mecánicas impuestas por los vehículos y su distribución direccional de circulación; la respuesta de la capa depende del espesor de la mezcla asfáltica, el área de contacto entre las superficies de las partículas de agregado[2]. Es importante estudiar cómo las mezclas asfálticas responden a estas cargas, beneficiando la información para el diseño y los procesos de mantenimiento del pavimento, asegurando el desempeño de la resistencia y la durabilidad [3],[4].

Las mezclas asfálticas para satisfacer los requisitos del asfalto han utilizado diferentes tipos de aditivos que modifican su reología y adherencia [5], actualmente se utilizan los nanomateriales o nanocompuestos para la modificación del asfalto logrando mejoras en varias de sus propiedades físicas y su desempeño a altas temperaturas. Por otra parte debido a la variada disponibilidad de asfaltos se han desarrollado diferentes tipos de nanomateriales, como son, nano sílice (NS) [5], nano carbono [6], nano arcilla [7], nano-TiO₂ [8], nano óxido de grafeno [9] y nano-Al₂O₃ [10,11]; estos nanomateriales son pequeñas partículas con tamaños de 1nm a 100 nm, con áreas de superficie específica muy grandes [12], [13].

La construcción de carreteras ha aumentado en los últimos años, de igual manera la demanda de agregados pétreos, produciendo grandes impactos ambientales en las fuentes aluviales y la degradación del paisaje en las canteras a cielo abierto; por estas razones la industria de la construcción de pavimentos asfálticos viene utilizando diferentes materiales que sustituyan en parte los agregados pétreos y lograr beneficios medioambientales, uno de esos materiales son las arcillas expandidas.

La arcilla expandida, es un agregado artificial cuya fabricación pasa por diversos procesos, como son, el triturado, micronizado, secado, aglomerado con agua, mezclado con carbonato cálcico y cocción en un horno de tres fases (precalentador entre 900 y 1000 °C, expansor entre 1150 y 1200 °C y enfriador con riego final) [14]. Considerando sus características de bajo peso, buena resistencia, ignífugo, químicamente inerte y pH básico la hace adecuada para la elaboración de mezclas asfálticas para capas de rodadura [15],[16]. La dosificación

adecuada de arcilla expandida es fundamental para obtener mezclas asfálticas, especialmente las mezclas asfálticas en frío si son requeridas características de resistencia [17], ahuellamiento,[18],[19], durabilidad [20]y rigidez [21].

Esta investigación tiene como objetivo determinar el comportamiento las propiedades físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica en frío a la cual se le remplazó totalmente los agregados naturales por una arcilla expandida de nombre Arlita.

Por los pocos estudios que se tienen en el país sobre el uso de las arcillas expandidas en mezclas asfálticas los resultados obtenidos en la investigación son relevantes como alternativa viable teniendo en cuenta su compactibilidad ambiental, al reducir la contaminación por la explotación de agregados, el consumo de agua utilizada para el lavado de los agregados, reducción de emisiones de gases que se producen al secar los agregados y finalmente se obtiene una superficie abierta de baja densidad, porosa, drenante y bajo ruido [22].

2. Enfoque de la investigación

El objetivo de la investigación fue determinar el comportamiento las propiedades físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica en frío a la cual se le remplazó totalmente los agregados naturales por Arlita. La investigación experimental cuantitativa se realizó con dos mezclas asfálticas, la primera mezcla (agregado + producto asfáltico) que corresponde a Arlita más emulsión asfáltica catiónica de rotura rápida (CRR-60) y la segunda mezcla (agregado + producto asfáltico + aditivo) que corresponde a Arlita más emulsión asfáltica catiónica de rotura rápida (CRR-60) y un aditivo de nano sílice líquida (NS); a las mezclas asfálticas se les realizaron los ensayos físico mecánicos de densidad bulk, porcentaje de vacíos, permeabilidad, pérdida por abrasión, tracción indirecta, módulo resiliente y el módulo elástico, siguiendo las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías de la República de Colombia (INVIAS 2022), que a la vez servirán de referencia para el análisis de datos, resultados y conclusiones.

3. Diseño metodológico de la investigación

El diseño se organizó por etapas, las cuales corresponden a la caracterización de los materiales, dosificación de las mezclas asfálticas, realización de ensayos de laboratorio y análisis de resultados; las etapas de caracterización, dosificación y ensayos se ejecutaron según las normas de ensayo de materiales INVIAS 2013 requeridas en cada caso.

4. Caracterización de los materiales

4.1. Agregado

Se realizó la caracterización de la Arlita, según la tabla 440–2 del artículo INVIAS 440-22, Mezclas Asfálticas en Frío Abiertas (MAF) para un nivel de tránsito NT1 ($\leq 0,5$ millones de ejes equivalentes de 80 kN en carril de diseño) [23]. Se muestran los resultados en la tabla 1.

REQUISITOS DE LOS AGREGADOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO NIVEL DE TRÁNSITO NT1					
CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	NORMA ENSAYOS	VALOR		RESULTADO ARLITA
			MIN	MAX	
Desgaste en la máquina de Los Ángeles	%	INV E-218	-	25	36
Resistencia mecánica por el método del 10 % de finos Valor en seco	kN	INV E-224	-	-	60
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio	%	INV E-220	-	18	0
Impurezas en agregado grueso,	%	INV E-237	-	0.5	0
Índice de Plasticidad	%	INV E-125 e INV E-126	NP	NP	No Plástico (NP)
Partículas planas y alargadas, relación 5:1	%	INV E-240	-	10	0
Caras fracturadas - Una cara	%	INV E-227	75	-	0
Agregado grueso: cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua hirviendo (%).	%	INV E-757	Bueno	-	Bueno
Densidad bulk	Kg/m ³	INV E-217	-	-	443
Absorción de agua	%	INV E-222	-	-	20

Tabla 1: Tabla comparativa de resultados de la caracterización de la Arlita.

Fuente: Adaptado de [23].

4.2. Granulometría

La franja granulométrica de referencia utilizada es la gradación abierta MAF-19 del artículo INVIAS 440-22, aplicable a los agregados de tamaño máximo 19 mm para producir mezclas asfálticas de tipo abierto, que no tienen en su distribución porcentajes significativos de agregado fino ni llenante mineral (tamaños menores a 0,150 mm). En la tabla 2 se muestra la distribución granulométrica de la Arlita.

FRANJA GRANULOMÉTRICA PARA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO GRADACIÓN ABIERTA MAF-19					
Tamiz (mm)	19	12.5	4.75	2.36	0.075
Tamiz (U.S. Standard)	3/4	1/2	Nro. 4	Nro. 8	Nro. 200
Pasa tamiz (%)	100-100	70-95	10-30	0-10	0-2
Arlita, Pasa tamiz (%)	100	100	34	0.9	0.5

Tabla 2: Distribución granulométrica de la Arlita investigada.

Fuente: Propia

4.4. Aditivo

El material de aditivo utilizado para elaborar la mezcla es una mezcla líquida basada en una suspensión de nano sílice amorfa (NS) que mejora la reología de la mezcla, mejora la textura mejora la trabajabilidad y mejora la adherencia entre el agregado y el material bituminoso. En la tabla 4 se muestran las características de la nano sílice utilizada.

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

Tabla 4: Características del aditivo de nano sílice.

Fuente: Propia.

5. Dosificación de la mezcla asfáltica.

5.1. Mezclado de los materiales

La fabricación de la mezcla se realizó añadiendo a la arcilla expandida el agua de pre envuelta con el aditivo líquido en un lapso que permita el hundimiento homogéneo de la arcilla expandida y luego se añade la cantidad de emulsión asfáltica requerida; la temperatura para el mezclado de los materiales fue la del ambiente.

5.2. Diseño de las mezclas asfálticas

De cada una de las mezclas de la investigación se preparó una serie de probetas con diferentes contenidos de emulsión asfáltica para determinar el porcentaje óptimo teórico de asfalto residual, utilizando el método Marshall basado en la superficie específica del agregado y la energía de compactación, se elaboraron probetas de ensayo, cada una, con 340g de mezcla asfáltica curada al aire por 72 horas a temperatura ambiente; se diseñó con seis diferentes contenidos de asfalto residual en incrementos del 1% entre ellos (6% al 11%), de manera que los resultados indiquen el contenido óptimo de asfalto. A la mezcla definida como óptima se le determinó el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas. en la tabla 5 se muestran los datos de la dosificación de cada mezcla asfáltica.

Asfalto residual (%)	6	7	8	9	10	11
Arlita (g)	320	316	313	309	306	303
Emulsión (g)	33	39	45	50	56	61
Nano sílice (g)	3,3	3,9	4,5	5,0	5,6	6,1
Agua de pre envuelta (g)	45	44	44	43	43	42

Tabla 5: Dosificación de la mezcla asfáltica para la elaboración de probetas de ensayo.

Fuente: Propia.

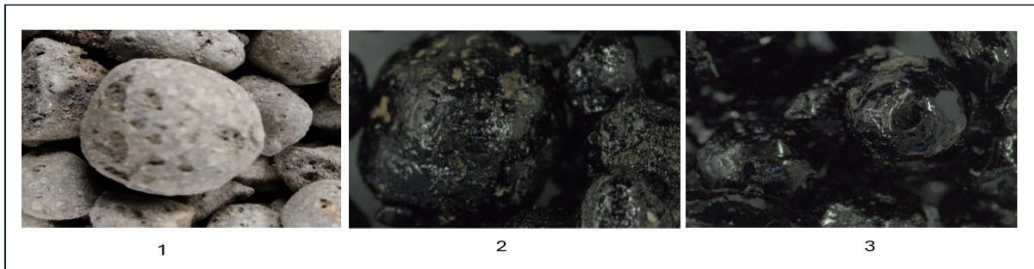


Figura 2: 1. Arlita; 2. Arlita+Emulsión; 3. Arlita+Emulsión+Nano Sílice
Fuente: Propia.

5.3. Energía de compactación

Es importante que el agregado soporte los esfuerzos recibidos en el proceso de compactación sin desintegrarse; por este motivo se determinó la degradación de las partículas de la arcilla expandida al ser sometidas a diferente número de golpes del martillo Marshal; se utilizaron tres energías de compactación en función del número de golpe por cara (25, 50 y 75). Se escogió la energía 1482 kilojulio por metro cúbico que se produce con 25 golpes por cara, se muestran los resultados en la tabla 6; la desintegración de las partículas se logró evidenciar comparado los tamaños de las partículas mediante granulometría por tamizado antes y después de la compactación. En la gráfica 3 se muestran la distribución de los tamaños de las partículas antes y después de la compactación.

Caras	2	2	2
Golpes por cara	25	50	75
Masa del martillo (N)	45,4	45,4	45,4
Altura de caída del martillo (m)	0,457	0,457	0,457
Volumen del molde (m ³)	0,0007	0,0007	0,0007
Energía de Compactación (kj/m ³)	1482,0	2964,0	4446,0

Tabla 6: Energía de compactación según el número de golpes por cara.
Fuente: Propia

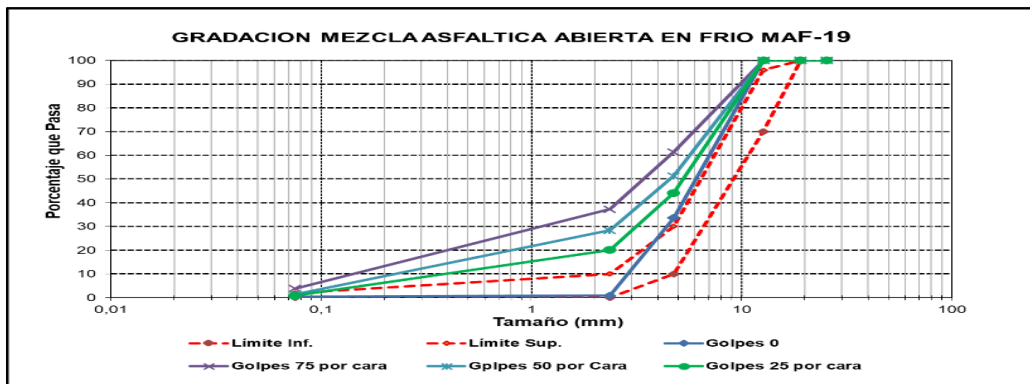


Figura 3. Tamaños de las partículas de Arlita antes y después de la compactación.
Fuente: Propia.

6. Población de las muestras

En total se realizaron 36 probetas, por cada mezcla se elaboraron 18 probetas, variando el porcentaje de asfalto, para cada porcentaje de asfalto se elaboraron 3 probetas a las cuales se les midió la densidad bulk, los vacíos con aire, la estabilidad y el flujo siguiendo las normas INV E-734, E-735, E-736 y E-748 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías de la República de Colombia de 2013. En la tabla 7 se muestran los resultados para cada contenido de asfalto.

Asfalto residual (%)	Densidad bulk kg/m ³	Vacíos con aire %	Estabilidad (N)	Flujo (mm)	Estabilidad / flujo (kN/mm)
6	670	22,9	4087	2,02	2,0
7	674	22,4	4346	2,15	2,0
8	678	21,9	4862	2,37	2,1
9	680	21,8	5121	2,54	2,0
10	680	21,7	5319	2,60	2,0
11	678	22,0	5140	2,68	1,9

Tabla 7: Resultados de las probetas de ensayo para cada porcentaje de asfalto.
Fuente: Propia.

7. Resultados

7.1. Resultados de la caracterización de las mezclas asfálticas

Los criterios utilizados para la definición preliminar del porcentaje óptimo de asfalto fueron las características de estabilidad y el flujo, tomándose el 10 % de asfalto residual como el óptimo de la mezcla asfáltica, que le corresponde un valor de estabilidad 13557 N y un valor de flujo de 2,6 mm

Se elaborando probetas de ensayo con el 10 % de asfalto residual para realizar los ensayos de verificación y determinar el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de las dos mezclas asfálticas en frío de estudio. Se realizaron en cuatro niveles de comportamiento:

Nivel 1: Compactación: Densidad bulk + Vacíos con aire + Estabilidad + Flujo.

Nivel 2: Sensibilidad al agua: Tracción Indirecta + Flujo + Permeabilidad + Cántabro.

Nivel 3: Resistencia: Tracción Indirecta + Compresión inconfinaada.

Nivel 4: Ensayos dinámicos: Módulo Elástico + Módulo resiliente + Deformación Plástica.

7.1.1. Nivel 1: Compactación: Densidad bulk + Vacíos aire + Estabilidad + Flujo

7.1.1.1. Densidad bulk

La densidad bulk se determinó mediante la norma INV E-733-13 “Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas absorbentes empleando especímenes recubiertos una película de parafina” [23]. La figura 4 ilustra el comportamiento de los resultados.

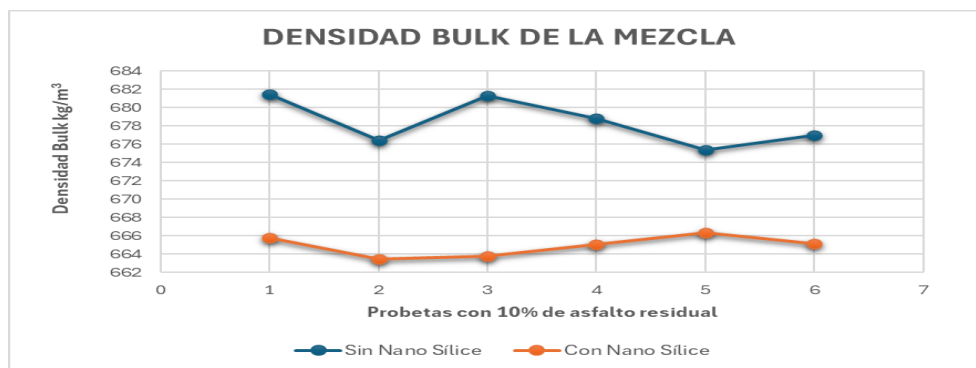


Figura 4. Resultados del ensayo densidad bulk de las mezclas.
Fuente: Propia.

7.1.1.2. Vacíos con aire

El porcentaje de vacíos con aire se determinó mediante la norma INV E-736-13 “Porcentaje de vacíos en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas” [23]. La figura 4 ilustra el comportamiento de los resultados.

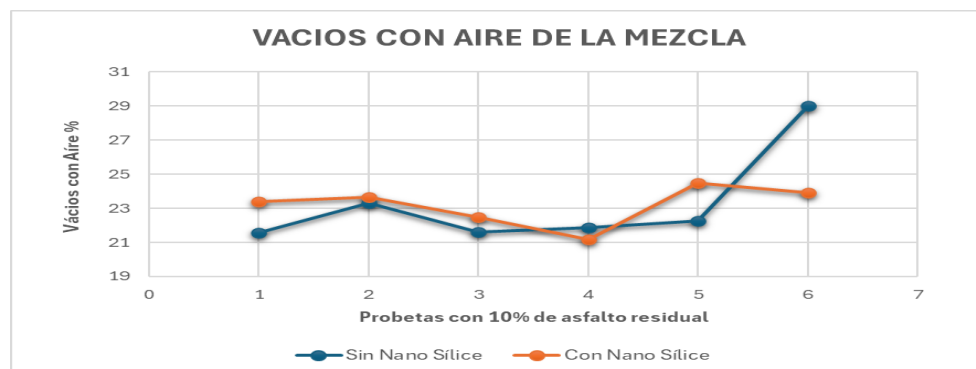


Figura 5. Resultados del ensayo de vacíos con aire de las mezclas.
Fuente: Propia.

7.1.1.3. Estabilidad

La estabilidad se determinó mediante la norma INV E-748 “Estabilidad y Flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo de Marshall” [23]. La figura 4 ilustra el comportamiento de los resultados.

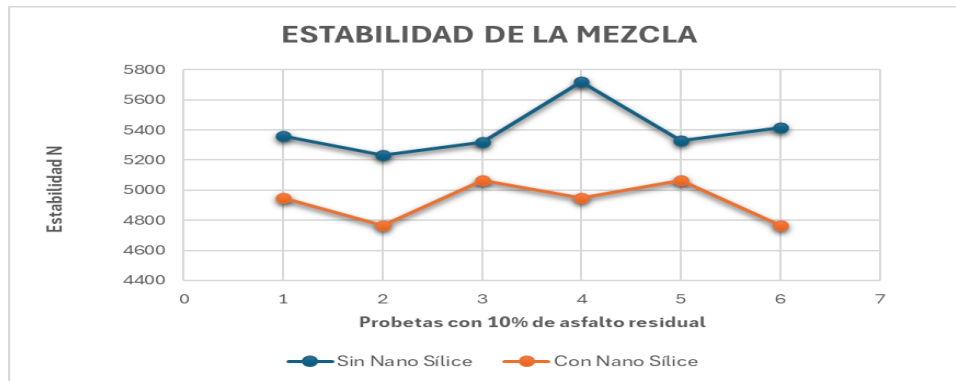


Figura 6. Resultados del ensayo de estabilidad de las mezclas.
Fuente: Propia.

7.1.1.4. Flujo

El flujo se determinó aplicando la norma INV E-748 “Estabilidad y Flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo de Marshall” [23]. La figura 6 ilustra el comportamiento de los resultados.

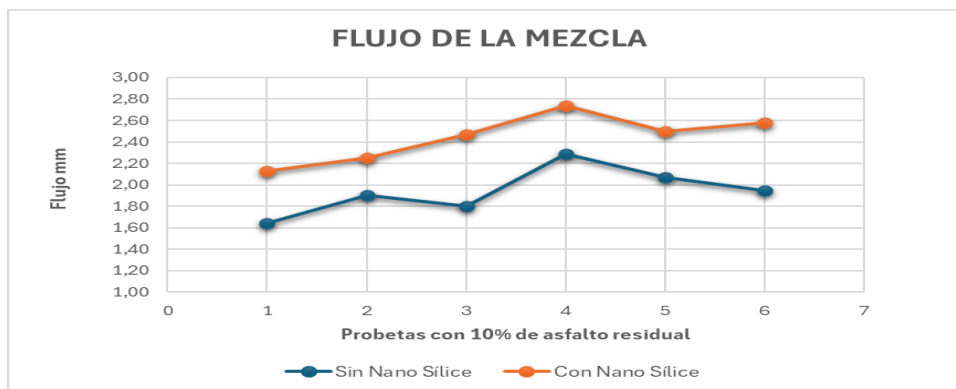


Figura 7. Resultados del ensayo de estabilidad de las mezclas.
Fuente: Propia.

7.1.2. Nivel 2: Sensibilidad al agua: Tracción Indirecta + Permeabilidad + Perdida por Cántabro

7.1.2.1. Tracción Indirecta en agua a 25°C:

Las probetas para determinar la sensibilidad al agua mediante el ensayo de resistencia a la tensión indirecta se acondicionaron en un baño de agua a 25°C durante dos horas, aplicando la norma INV E-748 “Determinación de la resistencia a la tensión indirecta (RTI) de mezclas asfálticas” [23]. La figura 7 ilustra el comportamiento de los resultados.

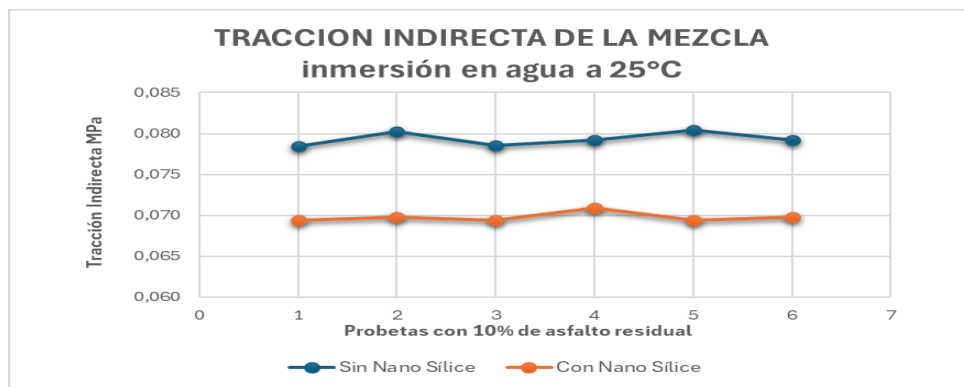


Figura 8. Resultados del ensayo de tracción indirecta en agua a 25°C de las mezclas. Fuente: Propia.

7.1.2.2. Permeabilidad

La capacidad de drenaje se determinó aplicando el artículo INV 453 “Mezcla Drenante” [23]. se colocaron 100 ml de agua sobre la superficie de cada probeta y se midió el tiempo que tarda el agua en atravesar la muestra, el cual no debe exceder de 15 segundos. La figura 7 ilustra el comportamiento de los resultados.

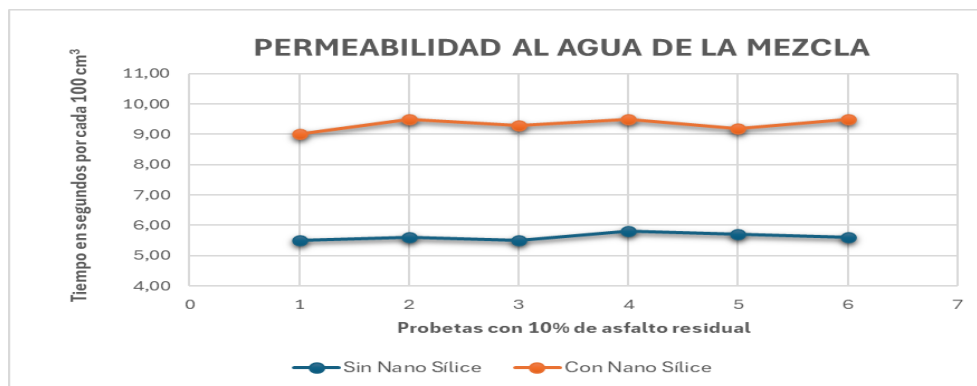


Figura 9. Resultados del ensayo de permeabilidad de las mezclas. Fuente: Propia.

7.1.2.3. Pérdida por desgaste de Cántabro

La pérdida por desgaste se determinó Aplicando la norma INV E-760-13 “Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo de cántabro de pérdida por desgaste” [23]., para cada mezcla asfáltica se sometiendo probetas a 100, 200 y 300 revoluciones en la máquina de Los Ángeles. La figura 7 ilustra el comportamiento de los resultados.

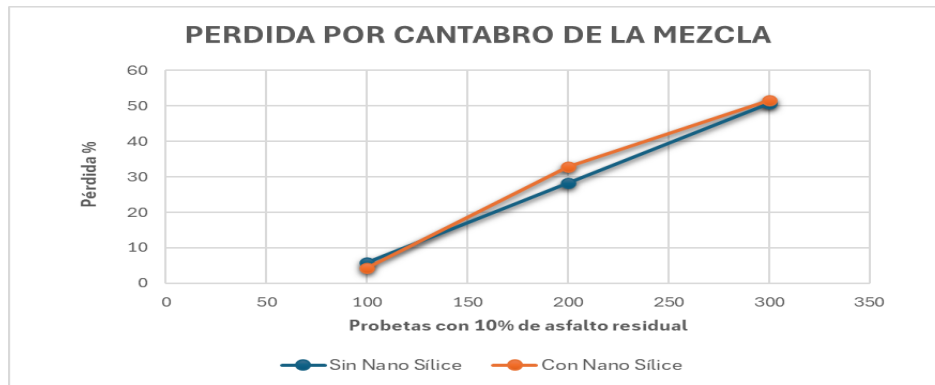


Figura 10. Resultados del ensayo de pérdida por desgaste de cántabro de las mezclas.
Fuente: Propia.

7.1.3. Nivel 3: Resistencia: Tracción Indirecta + Compresión inconfínada.

7.1.3.1. Tracción Indirecta

Las probetas para determinar el ensayo de resistencia a la tensión indirecta se acondicionaron en seco a 25°C, aplicando la norma INV E-748 “Determinación de la resistencia a la tensión indirecta (RTI) de mezclas asfálticas” [23]. La figura 10 ilustra el comportamiento de los resultados.

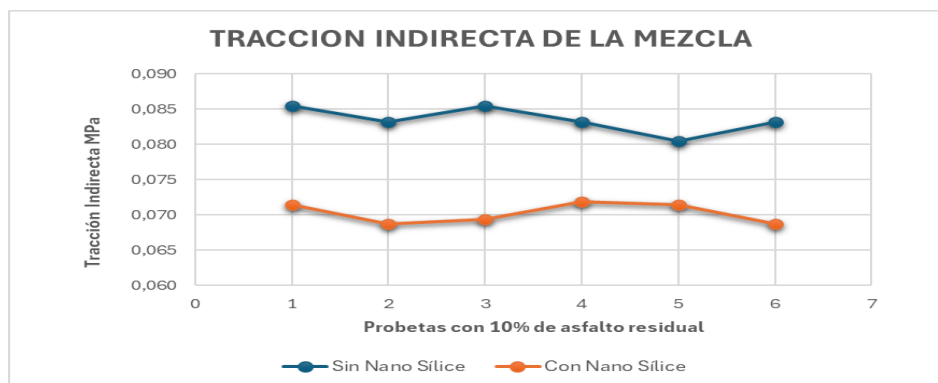


Figura 11. Resultados del ensayo de Tracción Indirecta de las mezclas.
Fuente: Propia.

7.1.3.2. Compresión inconfínada

El ensayo se realizó bajo condiciones de densidad, temperatura y deformación controladas; se elaboraron probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro por 200 mm de longitud con densidad bulk promedio de 624 kg/m³, las cuales se ensayaron a la temperatura del laboratorio de 23°C, aplicando una deformación controlada de 0,3% por minuto. La figura 11 ilustra el comportamiento de los resultados.

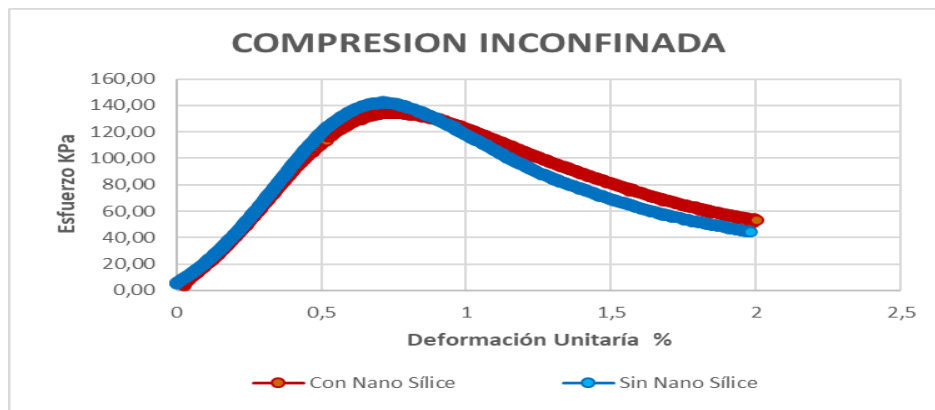


Figura 12. Resultados del ensayo de compresión inconfínada de las mezclas.

Fuente: Propia

7.1.4. Nivel 4: Ensayos dinámicos: Módulo Elástico + Módulo resiliente + Deformación Plástica

7.1.4.1. Módulo Elástico

El ensayo se realizó bajo condiciones de densidad, temperatura y frecuencia controladas; se elaboraron probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro por 200 mm de longitud con densidad bulk promedio de 624 kg/m³, las cuales se ensayaron a la temperatura del laboratorio de 25°C, aplicando una deformación controlada a una frecuencia de 10 Hz. La figura 12 ilustra el comportamiento de los resultados.

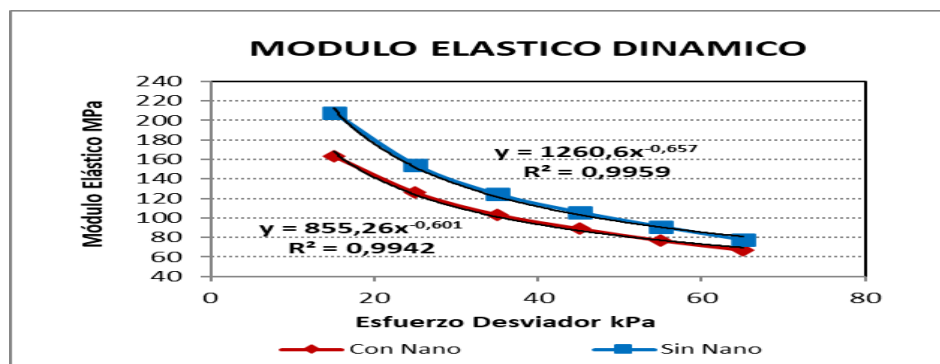


Figura 13. Resultados del ensayo de Módulo Elástico Dinámico de las mezclas.

Fuente: Propia.

7.1.4.2. Módulo resiliente

El ensayo se realizó bajo condiciones de densidad, temperatura y frecuencia controladas, se elaboraron probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro por 200 mm de longitud con densidad bulk promedio de 624 kg/m^3 , las cuales se ensayaron a la temperatura del laboratorio 23°C aplicando una deformación controlada a una frecuencia de 1,0 Hz. La figura 7 ilustra el comportamiento de los resultados.

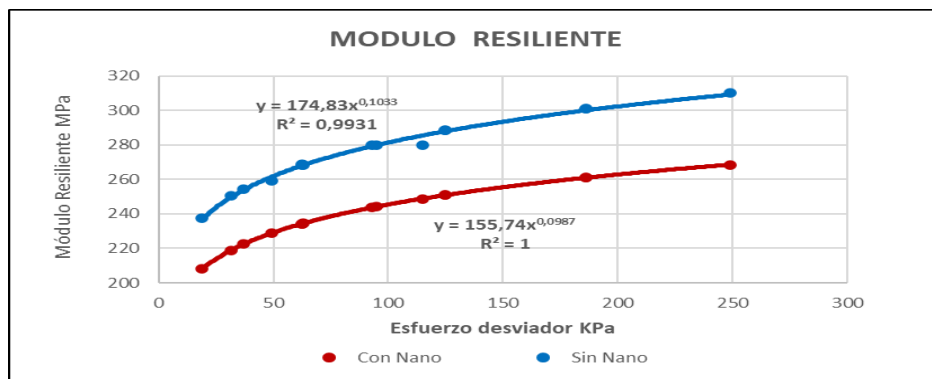


Figura 14. Resultados del ensayo de Módulo Resiliente de las mezclas.

Fuente: Propia

7.1.4.3. Deformación Permanente

El ensayo se realizó bajo condiciones de densidad, temperatura y frecuencia controladas, se elaboraron probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro por 200 mm de longitud con densidad bulk promedio de 624 kg/m^3 , las cuales se ensayaron a la temperatura del laboratorio de 23°C aplicando 5000 ciclos por deformación controlada a una frecuencia de 5 Hz. Las figuras 14 y 15 ilustran el comportamiento de los resultados.

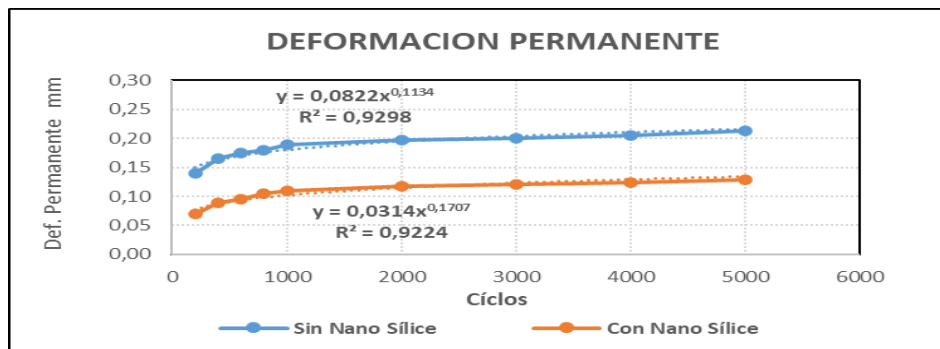


Figura 15. Resultados del ensayo de deformación permanente de las mezclas.

Fuente: Propia

8. Conclusiones

Con base en el análisis del comportamiento de la mezcla asfáltica en frío se pueden extraer las siguientes conclusiones:

I. Diseño de la mezcla asfáltica: Se encontró diferencias en la dosificación y conformación de las probetas de ensayo entre las mezclas asfálticas en frío tradicionales con agregados pétreos y la dosificación de la mezcla en frío con arcilla expandidas; la mezcla tradicional se realiza en mezcladoras mecánicas de recipientes abiertos y las mezclas con Arlita se deben realizar en mezcladoras mecánicas de recipientes cerrados, la Arlita por su baja densidad en estado seco es liviana y volátil por lo que tiende a salirse de la mezcladora, esta situación se soluciona parcialmente con la adición del agua de pre envuelta; la cantidad de mezcla utilizada en la conformación de las probetas de ensayo conformadas para la mezcla con Arlita es fue de 340 g, para una mezcla tradicional se utilizan aproximadamente 1200 g.

II. Energía de compactación: La energía de compactación utilizada de 1482 kilojulio por metro cúbico que se produce con 25 golpes por cara en el proceso de elaboración de las probetas de ensayo mostro su influencia en la desintegración de las partículas, se logró evidenciar en los ensayos de resistencia mecánica de realizados en el Nivel 3: Resistencia: Tracción Indirecta + Compresión inconfiada y Nivel 4: Ensayos dinámicos: Módulo Elástico + Módulo resiliente + Deformación Plástica; donde la falla de la probeta dejan ver que una cantidad considerable de partículas enteras sin degradación.

III. Densidad bulk: Las dos mezclas asfálticas, sin Nano Sílice y con Nano Sílice, son de baja densidad, presentaron densidad bulk promedio muy similares 678 kg/m^3 y 665 kg/m^3 con una diferencia del 2%. Los resultados muestran que la inclusión del aditivo en la mezcla no tiene una influencia que impacte el comportamiento de la densidad.

IV. Vacíos con aire: Las dos mezclas de estudio presentaron un porcentaje de vacíos con aire promedio de 23%, esto se debe a la forma redonda de las partículas de la Arlita que producen un alto porcentaje vacíos entre las partículas, los cuales no se logran llenar con el 10% del asfalto residual utilizado como porcentaje óptimo de la mezcla. El porcentaje de vacíos con aire de 23% cumple con los requisitos de Mezcla Drenante del artículo INVIAS 453-22 donde valores de los vacíos deben ser: mínimo 20% y máximo 25%.

VI. Estabilidad y Flujo: Las dos mezclas asfálticas, sin Nano Sílice y con Nano Sílice presentan cargas promedio de 5396 N y 4925 N y deformaciones 1,94 mm y 2,45 mm respectivamente cuando son ensayadas con inmersión en agua a 25°C ; las mezclas se destruyen parcialmente cuando son sometidas a inmersión en agua a 60°C , lo cual es una desventaja de las mezclas, por lo cual se concluye que las mezclas presentan alta sensibilidad a la temperatura.

VII Sensibilidad al agua: Los resultados de las dos mezclas correspondientes a la permeabilidad cumplen con los requisitos de Mezcla Drenante del artículo INVIAS 453-22;

el resultado de 25% de pérdida por desgaste por cántabro se logra para las dos mezclas con 175 revoluciones en la máquina de Los Ángeles, los requisitos de Mezcla Drenante del artículo INVIAS 453-22 exige que el 25% se logre con 300 revoluciones. Los resultados

VIII. Resistencia: Las dos mezclas asfálticas, sin Nano Sílice y con Nano Sílice presentan resistencia a la tracción indirecta promedio de 0,079 MPa y 0,070 MPa respectivamente cuando son ensayadas con inmersión en agua a 25°C y 0,083 MPa y 0,070 MPa respectivamente cuando son ensayadas secas a 25°C; obteniéndose una resistencia conservada de 95% sin Nano Sílice y 95% con Nano Sílice. Las mezclas cumplen con la resistencia conservada, pero presentan valores de la resistencia a la tracción indirecta muy bajos lo cual se puede mejorar con un aditivo aumente la adherencia entre el asfalto y las partículas de la Arlita.

IX. Ensayos dinámicos: Las propiedades del comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas son fundamentales para determinar los espesores de un pavimento. Las dos mezclas asfálticas, sin Nano Sílice y con Nano Sílice al ser sometidas a ciclos de carga y descarga en los ensayos de módulo elástico dinámico y módulo resiliente evidencian valores mayores en la mezcla sin Nano Sílice esto se debe al área superficie envuelta con asfalto, donde la superficie de la Arlita trabaja por fricción lo cual produce mayor resistencia, pero también mayor degradación del tamaño de las partículas, los módulos de la mezcla con Nano Sílice presenta 22% de menor resistencia, esto se debe que el área superficial de las partículas de Arlita se envuelven más con asfalto por la adherencia que produce la nano sílice al disminuir la consistencia del asfalto. Al someter las mezclas a 5000 ciclos de carga para obtener la deformación permanente las deformaciones sin nano sílice son de 0,213 mm y 0,129 con nano sílice, la nano sílice aumenta la deformación recuperada en la mezcla.

X. Análisis estadístico y graficas: Las tendencias presentadas en las gráficas para los resultados de los ensayos realizados nos llevan a concluir la homogeneidad de las mezclas investigadas.

9. Recomendaciones:

Este estudio de investigación se realizó utilizando probetas de ensayo compactadas mecánicamente por golpes o impactos del martillo Marshall que degradan las partículas de la arcilla expandida, por lo cual se recomienda evaluar en estudios investigativos posteriores la influencia que podría presentar el método de compactación por amasado o giros en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en frío.

También se encontró que la mezcla asfáltica en frío investigada tiene la propiedad de ser drenante, se recomienda hacer un estudio que permita dar solución a los problemas de colmatación de los vacíos, especialmente para este tipo de mezcla que presenta degradación de las partículas de la arcilla expandida que la pueden colmatar en el tiempo.

10. Referencias:

- [1] H. Zhu, J.E. Nodas, “Contact based analysis of asphalt pavement with the effect of aggregate angularity”, *Mechanics of Materials*, vol. 32, pp.193–202, Mar.2000, doi:10.1016/S0167-6636(99)00054-X
- [2] E. Masad, B. Muhunthan, N. Shashidhar, T. Harman, “*Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis*”, *Journal of computing in civil engineering*, vol.13, pp.88–95, Feb.1999
- [3] K. Siripun, P. Jitsangiam, and H. Nikraz, “*Permanent deformation behaviour and model of crushed rock base,*” *Australian Journal of Civil Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 41–52, Jan. 2010, doi: 10.1080/14488353.2010.11463955.
- [4] Alae M, Xu L, Cao Z, Xu X, Xiao F. “*Fatigue and intermediate-temperature cracking performance of rejuvenated recycled asphalt binders and mixtures: A review*” *Journal of Cleaner Production*, vol.384,pp.Jan.2023, doi:10.1016/j.jclepro.2022.135587
- [5] Li R, Xiao F, Amirkhani S, You Z, Huang J. “*Developments of nanomaterials and technologies on asphalt materials*” – A review”; *Constr.Build Mater*; 2017;143:633–48.
- [6] S.F. Brown, D. Needham, A Study of Cement Modified Bitumen Emulsion Mixtures, *Proceeding of AAPT* (2000) 69.
- [7] Amini A, Ziari H, Saadatjoo SA, Hashemifar NS, Goli A. Rutting resistance, fatigue properties and temperature susceptibility of nano clay modified asphalt rubber binder. *Constr Build Mater*, 2021, 267:120946.
- [8] Lima O, Afonso C, Rocha Segundo I, Landi S, Homem NC, Freitas E, et al. “*Asphalt binder Skincare aging evaluation of an asphalt binder modified by nano-TiO₂. Nanomaterials*”, (Basel, Switz),2022,12(10):1678.
- [9] Wang D, Zhang F, Huang K, Zhang L. “*Study on preparation and performance of advanced nano-modified epoxy asphalt*”, *J Appl Polym Sci*, 2023,140(14).
- [10] Bhat FS, Mir MS. “*Study investigating the influence of warm-mix asphalt additives on rutting and fatigue performance of nanomodified asphalt binders*”. *Transp Res Rec*, pp.719–31, 2022, 2676(4).
- [11] Ji Z, Sun L, Chen L, Gu W, Tian Y, Zhang X. “*Pavement performance and modification mechanisms of asphalt binder with nano-Al₂O₃*”, *Int J Pavement Eng*; pp.1–11, 2022, ahead-of-print (ahead-of-print).

- [12] Barot T, Rawtani D, Kulkarni P,” Nanotechnology-based materials as emerging trends for dental applications”, *Rev Adv Mater Sci*, pp. 173–89, 2021, 60(1).
- [13] Debbarma K, Debnath B, Sarkar PP. “A comprehensive review on the usage of nanomaterials in asphalt mixes”, *Constr Build Mater*, 2022, 361:129634.
- [14] Sandberg, U., and J. A. Ejsmont, “*Tyre/Road Noise Reference Book, INFORMEX Ejsmont & Sandberg Handelsbolag, Kisa, Sweden*”, 2002.
- [15] Lehmann, H. L., and V. Adam, “*Use of Expanded Clay Aggregate in Bituminous Construction. Highway Research Board Proceedings*”, Vol. 38, pp. 398–407, 1959.
- [16] Canestrari, F., M. Bocci, G. Ferrotti, and E. Pasquini, “*Mechanical Characterization of Environmentally Friendly Mixtures*” *Proc., International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials*, Athens, Greece, June 2007.
- [17] Biradarpatil, A. C., and Jaya, R. S., “*Laboratory Studies on Cold Bituminous Mixes with NanoTac Additive and its Effect on Curing Time*”, *i-manager’s J. Civil. Eng*, Vol. 7, No. 3 pp. 41-48, 2017, Doi: 10.26634/jce.7.3.13609.
- [18] Oruc Seref, Celik Fazil, Akpinar M. Vefa, “*Effect of Cement on Emulsified Asphalt Mixtures*”, *Journal of Materials Engineering and Performance (ASM International)*, vol 16 (5), pp. 578–583, 2007.
- [19] James Alan, *Cold Mix Design in North America*, Akzo Nobel Surface Chemistry LLC, 7101 Adams St, Willowbrook, IL 60527, U.S.A., 2002.
- [20] Institute Manual Series No.14 (AI MS 14), *Asphalt Cold Mix Manual*, Third Edition, Part IV, Appendix F, USA, 1989.
- [21] Institute Manual Series No.19 (AI MS 19), *Asphalt Cold Mix Manual*, Third Edition, USA, 1997.
- [22] Losa, M., P. Leandri, and R. Bacci. “*Measurements of Pavement Macrottexture with Stationary and Mobile Profilometers*”, *Proc., MAIREPAV5, The Fifth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*, Park City, Utah, Aug. 2007.
- [23] Normas de ensayo de materiales para carreteras, INVIAS, 2013, Instituto Nacional de Vías, <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-normas-de-ensayo-de-materiales-para-carreteras>.