



Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas en caliente con adición de zeolita natural

Study of the behavior of hot asphalt mixes with the addition of natural zeolite

Estudo do comportamento do asfalto misturado a quente com adição de zeólita natural

Mario Leonardo Pincay-Suárez ^I
mpincay6540@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8749-7360>

Anadelys Alonso-Aenlle ^{II}
anadelys@civil.cujae.edu.cu
<https://orcid.org/0000-0003-2625-2129>

Correspondencia: mpincay6540@utm.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 23 de julio de 2022 * **Aceptado:** 18 de agosto de 2022 * **Publicado:** 28 de septiembre de 2022

- I. Ingeniero Civil, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Maestría Académica con Trayectoria de Investigación en Ingeniería Civil, Mención Vialidad, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.
- II. Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" CUJAE, Profesora del Departamento de Construcciones y Viales de la Facultad de Ingeniería Civil, Ingeniero Civil, Profesor Titular, Doctor en Ciencias, Cuba.

Resumen

Las mezclas asfálticas en caliente, tienen un desempeño mejor que las mezclas en frío; no obstante, tienen desventajas tales como el envejecimiento temprano del cemento asfáltico durante la producción de la mezcla asfáltica en caliente, los gases contaminantes y los costos elevados. Por ello, en esta investigación el objetivo general es estudiar el comportamiento de una mezcla asfáltica en caliente con adición de zeolita natural mediante la metodología Marshall y su comparación frente a las mezclas asfálticas convencionales. La metodología utilizada se fundamenta en el diseño experimental, comparando la mezcla patrón con la de adición de zeolita natural. En los resultados, se tiene en un primer lugar, algunos de los antecedentes y especificaciones para abordar en lo teórico sobre el trabajo donde se proponen mejoras tecnológicas e innovadoras en la creación de nuevas mezclas asfálticas y en segundo lugar se encuentra la fase operativa, que implica todo el trabajo realizado en laboratorio para determinar y evaluar las variables. Aquí, se detallan las características de los materiales utilizados, procedimientos normados para la fabricación de las mezclas asfálticas y las probetas. Como resultado, la incorporación de zeolita a las mezclas permite variar, disminuir o aumentar algunas de las propiedades que caracterizan a la mezcla. Esto a su vez indica la factibilidad técnica de confeccionar mezclas asfálticas en caliente con incorporación de zeolita natural ecuatoriana.

Palabras claves: Mezcla; Asfáltica; Zeolita; Metodología Marshall.

Abstract

Hot asphalt mixes perform better than cold mixes; however, they have disadvantages such as early aging of the asphalt cement during hot mix asphalt production, polluting gases, and high costs. Therefore, in this research the general objective is to study the behavior of a hot asphalt mixture with the addition of natural zeolite using the Marshall methodology and its comparison with conventional asphalt mixtures. The methodology used is based on the experimental design, comparing the standard mixture with the addition of natural zeolite. In the results, there are in the first place, some of the background and specifications to address theoretically about the work where technological and innovative improvements are proposed in the creation of new asphalt mixtures and in second place is the operational phase, which it involves all the work done in the laboratory to determine and evaluate the variables. Here, the characteristics of the materials used,

standardized procedures for the manufacture of asphalt mixtures and test tubes are detailed. As a result, the incorporation of zeolite to the mixtures allows to vary, decrease or increase some of the properties that characterize the mixture. This in turn indicates the technical feasibility of making hot asphalt mixtures with the incorporation of natural Ecuadorian zeolite.

Keywords: Mix; asphalt; Zeolite; Marshall Methodology.

Resumo

As misturas asfálticas quentes têm melhor desempenho do que as misturas frias; no entanto, apresentam desvantagens como envelhecimento precoce do cimento asfáltico durante a produção de asfalto misturado a quente, gases poluentes e custos elevados. Portanto, nesta pesquisa o objetivo geral é estudar o comportamento de uma mistura asfáltica a quente com adição de zeólita natural utilizando a metodologia Marshall e sua comparação com misturas asfálticas convencionais. A metodologia utilizada baseia-se no delineamento experimental, comparando a mistura padrão com a adição de zeólita natural. Nos resultados, encontram-se em primeiro lugar, alguns dos antecedentes e especificações para abordar teoricamente sobre o trabalho onde são propostas melhorias tecnológicas e inovadoras na criação de novas misturas asfálticas e em segundo lugar está a fase operacional, que envolve todos o trabalho feito em laboratório para determinar e avaliar as variáveis. Aqui, são detalhadas as características dos materiais utilizados, procedimentos padronizados para a fabricação de misturas asfálticas e tubos de ensaio. Como resultado, a incorporação de zeólita às misturas permite variar, diminuir ou aumentar algumas das propriedades que caracterizam a mistura. Isso, por sua vez, indica a viabilidade técnica de fazer misturas asfálticas a quente com a incorporação de zeólita natural equatoriana.

Palavras-chave: Mistura; asfalto; Zeólito; Metodologia Marshall.

Introducción

En la actualidad, el medio principal de transporte tanto de personas como de bienes y servicios es mediante la circulación de los vehículos en las carreteras, ocurriendo en los últimos años un aumento considerable en los volúmenes de tráfico (Barrera, 2017). En este sentido, las exigencias y el tránsito en el Ecuador demandan de la construcción de miles de kilómetros de carreteras

anualmente, en el que se observan construcción de nuevas vías y reconstrucción de los pavimentos en la vialidad existente.

Por otro lado, el tipo de diseño de mezcla asfáltica más utilizada en el Ecuador sigue siendo la mezcla asfáltica en caliente. La producción de este tipo de mezclas demanda de altas temperaturas las cuales emanan al medio ambiente gases tóxicos como el CO₂ y otros gases que aumentan el calentamiento global.

La industria de la construcción de carreteras se ha enfocado en mejorar o igualar las propiedades mecánicas de las mezclas mediante el desarrollo de nueva tecnologías más sustentables (Loren et al., 2018). Ciertamente, con una mayor concientización acerca del necesario sostenimiento del medio ambiente aunado a las estrictas regulaciones de emisiones de gases por parte de los entes reguladores ha llevado a que se desarrollen nuevas técnicas para la producción de mezclas de asfalto en caliente, como por ejemplo la mezcla de asfalto, mezclas asfálticas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con grano de caucho reciclado, entre ellas también encontramos la elaboración y aplicación del diseño de mezcla asfáltica en caliente con zeolita natural, y así lograr que sean más duraderas, económicas y disminuir los aspectos negativos de contaminación ambiental.

En esta investigación se persigue el estudio de nuevos materiales para la producción de mezclas asfálticas, objetivamente en estudiar la influencia del mineral zeolita en el diseño de mezclas modificadas mediante la metodología de diseño Marshall, disminuyendo la temperatura de producción de la mezcla convencional. Los resultados se compararán con el diseño de una mezcla asfáltica convencional, buscando propiedades similares a las que exigen en los reglamentos vigentes ecuatorianos.

En este contexto, el uso de una mezcla modificada con zeolita natural tiende a reducir la temperatura de producción en relación con una mezcla asfáltica convencional, por lo que, reduce el envejecimiento y oxidación del cemento asfáltico y aumentaría su vida útil, así como también se obtendrán ventajas ambientales, que permitirán disminuir la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, el consumo de combustible y el costo de producción de la mezcla.

Bajo todo este contexto, es importante responder a la pregunta problematizadora sobre ¿Cómo influirá la adicción de zeolita natural en el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente mediante la metodología Marshall, frente a mezclas asfálticas convencionales?, lo cual lleva al objetivo general de la investigación que es: estudiar el comportamiento de la mezcla asfáltica en

caliente con adición de zeolita natural mediante la metodología Marshall y su comparación frente a las mezclas asfálticas convencionales.

Metodología

La metodología se fundamenta en el diseño experimental. Hernández y Mendoza (2018), mencionan que este tipo de diseños, “manipulan y prueban tratamientos, estímulos, influencias o intervenciones (denominadas variables independientes), para observar sus efectos sobre otras variables, las dependientes en una situación de control”. Al respecto, las variables independientes son: el porcentaje de zeolita natural a incorporar en la mezcla; las variables dependientes son los parámetros de las mezclas (densidad, estabilidad, deformación, porcentaje de vacíos en el agregado, porcentaje de huecos de aire en la mezcla, porcentaje de hueco llenos de asfalto).

En cuanto a las variables de control son: la granulometría de los áridos minerales, porcentaje de asfalto en la mezcla y temperatura de producción. Para este diseño experimental, se comparan la mezcla asfáltica con zeolita natural con una convencional, además de que se estará trabajando con ensayos de laboratorio y datos que se relacionan con la hipótesis del estudio, la cual es que la modificación de la mezcla asfáltica con la adición de la zeolita natural, permitirá reducir la viscosidad del asfalto, disminuyendo la temperatura de fabricación y compactación de las mezclas.

Se trabajó con la mezcla asfáltica diseñada con zeolita natural y la mezcla asfáltica convencional. De allí se tomó la cantidad de mezcla asfáltica tanto con zeolita natural como convencional, colocadas en probetas, a las que se le aplicarán los ensayos referidos al método Marshall, todo ello bajo las especificaciones de los centros de investigación americanos como la AASHTO y ASTM, como también por la norma técnica ecuatoriana y el Manual de Carreteras.

Resultados

En primer lugar, algunos de los antecedentes y especificaciones propias para el abordaje del trabajo se establece en que la industria de la construcción a diario propone mejoras tecnológicas e innovadoras en la creación de nuevas mezclas asfálticas y pavimentos flexibles que de cierta forma mejoren el rendimiento de los materiales, respeten y conserven los recursos a utilizar,

aumenten la eficiencia constructiva y lo pongan en la vanguardia del avance medioambiental (Zaumanis, 2010).

En este contexto, se tiene que, durante la colocación de las mezclas, la temperatura debe ser lo suficientemente alta como para asegurar la trabajabilidad de las mezclas, pero al mismo tiempo debe de estar por debajo del límite que provoque excesivo envejecimiento del ligante (Newcomb, 2007). Así tenemos, que a nivel mundial existen diferentes tecnologías que admiten la fabricación de mezclas asfálticas de menores temperaturas a diferencia de las tradicionales mezclas asfálticas en caliente, pese a que su uso sólo se ha modificado en América del Norte y Europa.

El método de diseño más utilizado y señalado para las mezclas asfálticas en caliente, es el Método Marshall, el cual se utilizó en el desarrollo de esta investigación para diseñar las mezclas que se fabricaron y ensayaron. Se basa en la medición y cálculo de algunas propiedades volumétricas y mecánicas, con las cuales se busca establecer un porcentaje óptimo de asfalto para confeccionar una mezcla que cumpla los criterios de diseño que se tengan para el tipo de capa asfáltica o pavimento que se construirá.

La fase operativa de la investigación, implica todo el trabajo realizado en laboratorio para determinar y evaluar las variables antes descritas. En este contexto, se detallan las características de los materiales utilizados, procedimientos normados para la fabricación de mezclas asfálticas y probetas, y los ensayos utilizados. Posteriormente, se presentan los resultados de trabajos experimentales preliminares referidos a la caracterización de materiales y diseño de la mezcla patrón, respectivamente.

El asfalto del presente diseño, proviene de la Refinería Estatal de Esmeraldas. Asimismo, el cemento asfáltico que se utilizó es del tipo AC-24 60/70 para todas las mezclas realizadas. Sus características se presentan en la tabla 1:

Figura 1: Características generales del cemento asfáltico AC 60-70

| Parámetros del ligante asfáltico | | | |
|---|-------------|--------|----------|
| Ensayo | Método | Unidad | CA 60-70 |
| Penetración (25°C, 100 g, 5 s) | ASTM D-5 | 0.1 mm | 67 |
| Índice de Penetración | INV. E-724 | - | -0,7 |
| Viscosidad absoluta (60 ° C) | ASTM D-4402 | Poises | 1.750 |
| Ductilidad (25°C, 5 cm/min) | ASTM D-113 | cm | >105 |

| | | | |
|--------------------------------|-------------|----|------|
| Solubilidad en tricloroetileno | ASTM D-2042 | % | >99 |
| Contenido de agua | ASTM D-95 | % | <0,2 |
| Punto de inflamación COC | ASTM D-92 | °C | 275 |

Fuente: Pincay, 2022.

Los agregados pétreos empleados en el diseño de la mezcla asfáltica, provienen del sector San Isidro y la arena de río se la obtiene del Cantón Santo Domingo de los Tsáchilas. Para el efecto se consideran cuatro tipos de áridos: Árido #1 (material triturado proveniente de san Isidro pasante por malla 3/4”); Árido #2 (material triturado proveniente de san Isidro pasante por malla 3/8”); Árido #3 (arena natural lavada proveniente de Santo Domingo, tamaño máximo 3/8”); y, Árido # 4 (zeolita natural proveniente de la Cantera Zeonatec, en forma de filler).

En cuanto a la zeolita, tiene características mineralógicas en la que se puede mencionar que el componente principal es la Clinoptilolita-Mordenita, aun cuando posee otros componentes como Plagioclasa, Esmectita y Cuarzo. Al respecto, es importante referir que las zeolitas son estructuras de silicatos con grandes espacios vacíos que permiten la presencia de cationes tales como Sodio (Na⁺) y Calcio (Ca²⁺) y de moléculas de agua (H₂O), ver tabla 2 y figura 1.

Figura 2: Características físico-químicas de la zeolita utilizada

| IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO | |
|--|---|
| Tipo mineral | No metálico |
| Nombre Científico | Clinoptilolita |
| Nombre Genérico | Zeolita Natural |
| Fórmula Química | SiO ₂ AL ₂ O ₃ MgOH ₂ O |
| Composición Química | |
| Dióxido de silicio, Óxido de aluminio, Óxido de potasio, Óxido de hierro, Óxido de Magnesio, Óxido de Calcio, Óxido de potasio, Óxido de hierro, Óxido de Sodio. | |

Fuente: Ficha técnica del producto, zeonatec 2022.

Fuente: Pincay, 2022.



Figura 3: Vista de la zeolita utilizada.

Para la preparación de las probetas de ensayo se realizó siguiendo las normativas vigentes estipuladas en el Ecuador (MTOPE). En cuanto a la preparación del árido mineral a utilizar, primero fueron secados en horno hasta masa constante a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ para luego realizar la reconstitución granulométrica. Posteriormente se pesaron para cada probeta de ensayo, la cantidad necesaria de cada fracción de árido con el fin de producir una muestra que 1500 g conteniendo los distintos tamaños de la granulometría semidensa (Figura 2).

Fuente: Pincay, 2022.



Figura 4: Separación de áridos según tamaño, luego de tamizado, para reconstitución granulométrica. (Der.) Pesaje de las fracciones de árido para formar muestras de 1500 g de árido en granulometría semidensa e incorporación de zeolita.

Así, para realizar el mezclado del árido con el asfalto, se calentó el árido en horno a una temperatura de aproximadamente 30°C y posteriormente se dispuso en el bol de mezclado.

Luego se formó un cráter en el agregado y se pesó la cantidad necesaria de cemento asfáltico a la temperatura de mezclado de 135 °C, vertiéndolo sobre el agregado. En este instante también fue incorporada la zeolita en las muestras que llevarían un porcentaje según lo dispuesto en el diseño experimental (figura 3).

Fuente: Pincay, 2022.



Figura 5: Contenedores de aluminio para calentado en horno de muestras de 1500 g de cemento asfáltico (izq.).
Calentamientos de cemento asfáltico (der).

La masa de zeolita incorporada estaba constituida por un 8,20 % en tamaño 0,15 mm (N°100), un 6.90 % en tamaño 0,75 mm (N°200) y un 6.20 % de tamaño menor a 0,075 mm (bajo N°200). A su vez, para no alterar significativamente el peso específico del árido combinado, la zeolita reemplazó en peso equivalente al árido (cisco) cuyo tamaño coincide con la zeolita incorporada en cada mezcla; así, para una probeta de 1500 g y 0,3% de zeolita, se extrajeron 3,30 g de árido en los tamaños y porcentajes indicados, y se incorporó 3,30 g de zeolita. Debido a que la zeolita utilizada presenta una densidad similar al árido utilizado, el reemplazo parcial de árido fino se realizó en peso. El proceso de mezclado se llevó a cabo en forma manual mediante espátula durante un tiempo de 5 minutos para todas las mezclas.

Así, se prepararon los moldes a utilizar y con el martillo Marshall se aplicaron 75 golpes, en un tiempo no superior a 90 s, aplicando en la otra cara el mismo número de golpes en un tiempo no mayor al indicado (ver figura 4).

Fuente: Pincay, 2022.



Figura 6: Mezcla asfáltica directo a compactación a temperatura de 120 ° C.

Tan pronto como las probetas compactadas se enfriaron a temperatura ambiente, se procedió a determinar su densidad de acuerdo al método descrito en la norma ecuatoriana.

El procedimiento completo de medición de estabilidad y fluencia, comenzando desde el momento en que se retira la probeta del agua, no debe durar más de 30 s. En la Figura 5 se muestra el ensayo de una probeta.

Fuente: Pincay, 2022.



Figura 7: Mezcla asfáltica directo a compactación a temperatura de 120 ° C.

La combinación de los agregados con el cemento asfáltico se realiza en caliente en la planta asfáltica, de acuerdo con la metodología recomendada por: EL INSTITUTO DEL ASFALTO

manual MS-22 año 1992. En referencia con el Manual de Especificaciones Generales del MOP.001-F-2002 en lo referente a capas de rodadura.

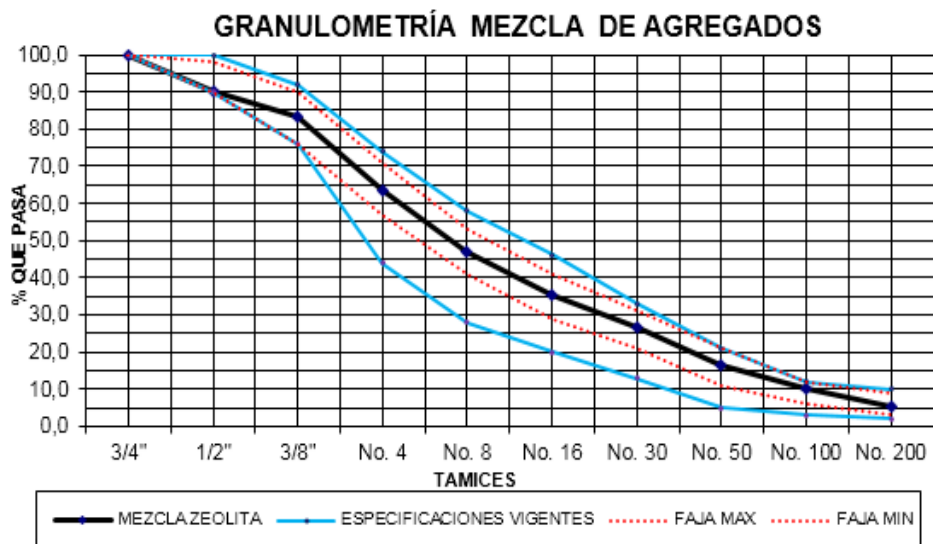
De esta manera se obtienen granulometrías que cumplen especificaciones para carpeta asfáltica, tamaño nominal. A continuación en la tabla 3 se detalla los respectivos porcentajes de los áridos que interviene en la mezcla, tanto para la mezcla patrón, así como la mezcla con adición de zeolita natural. Finalmente, en la Figura 6, se detallan la granulometría de los áridos combinados que cumple con las especificaciones MOP-001 F-2002 TABLA 405-5.1 relativas a los límites de la banda granulométrica.

Figura 8: Granulometría de los áridos combinados

| MEZCLA DE AGREGADOS | | | | | | | | | | |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|-------|--------|-------|------------------|-------------|-------|
| TAMICES | TAMAÑOS | RIP 3/4 | RIP 3/8 | ZEOLITA | ARENA | MEZCLA | MEDIA | ESPECIFICACIONES | TOLERANCIAS | |
| mm | ASTM | % PASA | | | | | | | | |
| 3/4" | 19.00 | 100.00 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100 | 100 | 100 | ± 8 % |
| 1/2" | 12.5 | 56.55 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 90.0 | 95 | 90 | 100 | ± 8% |
| 3/8" | 9.50 | 28.20 | 99.6 | 100.0 | 99.5 | 83.2 | | | | |
| No. 4 | 4.75 | 3.43 | 79.70 | 100.00 | 98.90 | 63.6 | 59 | 44 | 74 | ± 7%. |
| No. 8 | 2.36 | 1.88 | 56.30 | 98.00 | 97.80 | 46.9 | 43 | 28 | 58 | ± 6% |
| No. 16 | 1.18 | 1.74 | 40.50 | 45.70 | 95.00 | 35.4 | | | | |
| No. 30 | 0.60 | 1.58 | 28.60 | 13.30 | 87.00 | 26.4 | | | | |
| No. 50 | 0.30 | 1.35 | 19.00 | 8.20 | 38.00 | 16.2 | 13 | 5 | 21 | ± 5%. |
| No. 100 | 0.15 | 1.09 | 12.70 | 6.90 | 12.00 | 9.9 | | | | |
| No. 200 | 0.075 | 0.81 | 7.20 | 6.20 | 4.30 | 5.5 | 6 | 2 | 10 | ± 3% |

Fuente: Pincay, 2022.

Figura 9: Curva de distribución granulométrica de los áridos combinados



Fuente: Pincay, 2022.

Para el diseño experimental, se confeccionó una mezcla asfáltica caliente denominada “Mezcla Patrón” donde es una mezcla asfáltica densa, mediante el método Marshall, siguiendo las indicaciones del MOP-001 F-2002 TABLA 405-5.1. Esta mezcla se fabricó con el fin de servir como parámetro evaluador para comparar el desempeño de las mezclas con incorporación de zeolita, ya que esta mezcla asfáltica se produjo a las temperaturas convencionales de mezclas en caliente según la normativa ecuatoriana (Dirección de Vialidad, MOP, 2017). A continuación, en la siguiente tabla 4 se presenta lo resultados según el óptimo de asfalto obtenido.

Figura 10: Propiedades volumétricas, estabilidad y fluencia de la mezcla Patrón con el óptimo de asfalto.

| MEZCLA PATRÓN | | |
|----------------------|-----------------------|-------------------|
| PROPIEDADES | VALOR OBTENIDO | EXIGENCIAS |
| % DE ASFALTO | 5.15 % | |
| ESTABILIDAD | 4204 lbs | > 1800 lbs |
| FLUJO | 11.6 pulg | 8 - 16 pulg/100 |
| PESO UNITARIO | 2556 Kg | N. A. |
| VACIOS EN MEZCLA | 3.92 % | 3.0 - 5.0 % |
| VACIOS EN AGREGADOS | 14.27 % | > 13% |

Fuente: Pincay, 2022.

Así, para los resultados de las mezclas en caliente con zeolita natural ecuatoriana, se desarrollaron mezclas donde se le añadió la zeolita natural en una granulometría en forma de filler: 0,3%; 0,6%; 0,9% para 4,5%, 5%; 5.5 % de asfalto, para efecto de estudio solo se va a trabajar con estos tres porcentajes de asfalto ya que en ellos está contemplado el contenido óptimo de la mezcla patrón.

La zeolita fue añadida en el momento de mezclado de los áridos y el asfalto. Asimismo, las temperaturas de trabajo fueron 150°C y 160°C para las mezclas convencionales y para las mezclas con adición de zeolita se utilizaron la temperatura de mezclado y compactación fueron de 135 °C y 125 °C, respectivamente.

Discusión

A las mezclas se le realizaron ensayos de densidad, porcentajes de huecos en mezcla y áridos, estabilidad y deformación Marshall. La Mezcla 0,3%, Mezcla 0,6% y Mezcla 0,9%, corresponden a las 3 mezclas que se les incorporó zeolita en el porcentaje indicado; en la Tabla 5, se resumen la temperatura de mezclado y compactación de cada una de las muestras a partir de las cuales se verificará el efecto de la disminución de la temperatura de producción en sus propiedades volumétricas y mecánicas.

Figura 11: Temperaturas de trabajo e incorporación de zeolita en las mezclas.

| MEZCLAS | TEMPERATURA DE MEZCLADO (°C) | TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C) | INCORPORACIÓN DE ZEOLITA (%) | GRAMOS DE ZEOLITA EN PROBETA DE 1500 g | % DE ASFALTO |
|---------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|--|--------------|
| Mezcla Patrón | 165 | 150 | 0 | 0 | 4,5-5,0-5,5 |
| Mescla 0.3 % | 135 | 125 | 0.3 | 4.5 | 4,5-5,0-5,5 |
| Mescla 0.6 % | 135 | 125 | 0.6 | 9 | 4,5-5,0-5,5 |
| Mescla 0.9 % | 135 | 125 | 0.9 | 13.5 | 4,5-5,0-5,5 |

Fuente: Pincay, 2022.

Luego, en la Tabla 6, se muestra un cuadro resumen de los valores que se obtuvieron, en las distintas mezclas, de las propiedades volumétricas, resistencia a deformación plástica (estabilidad) y fluencia. Se incluyen además los valores correspondientes a la mezcla patrón para ser comparados con las mezclas trabajadas a menor temperatura.

Figura 12: Propiedades volumétricas, estabilidad y deformación de la Mezcla Patrón y de las mezclas con incorporación de zeolita natural ecuatoriana

| MEZCLA | DENSIDAD BULK Kg/m ³ | ESTABILIDAD Lb. | DEFORMACIÓN % | PORCENTAJE DE VACÍOS EN EL AGREGADO V.A.M. % | VACIOS CON AIRE VA % | VF % | ÓPTIMO DE ASFALTO % |
|---------------|------------------------------------|--------------------|------------------|---|-------------------------|---------|------------------------|
| Mezcla Patrón | 2544 | 3953.31 | 9.00 | 14.05 | 5.26 | 62.58 | |

| | | | | | | | |
|------------------|------|---------|-------|-------|------|-----------|-----|
| Mezcla 0.3% | 2480 | 3722.00 | 10.00 | 16.16 | 7.23 | 55.2 5 | 4.5 |
| Mezcla 0.6% | 2512 | 4127 | 9.00 | 15.00 | 6.92 | 54.3 0 | |
| Mezcla 0.9% | 2506 | 3869.00 | 9.00 | 15.12 | 6.91 | 54.2 6 | |
| Mezcla Patrón | 2553 | 4174.95 | 11.00 | 14.22 | 4.39 | 69.1 3 | 5 |
| Mezcla 0.3% | 2503 | 4060.00 | 11.67 | 15.83 | 5.62 | 64.4 9 | |
| Mezcla 0.6% | 2527 | 4236.00 | 11.73 | 14.94 | 5.41 | 63.8 2 | |
| Mezcla 0.9% | 2519 | 4201.00 | 10.93 | 15.15 | 5.53 | 63.4 7 | |
| Mezcla Patrón | 2567 | 4272.00 | 13.00 | 14.20 | 2.83 | 80.0 6 | 5.5 |
| Mezcla 0.3% | 2522 | 4303.00 | 13.33 | 15.62 | 4.20 | 73.1 2 | |
| Mezcla 0.6% | 2541 | 4372.00 | 13.80 | 14.92 | 3.83 | 74.3 2 | |
| Mezcla 0.9% | 2528 | 4355.00 | 12.87 | 15.28 | 4.26 | 72.1 4 | |

Fuente: Pincay, 2022.

Por ejemplo, se detalla, la mezcla a la que se redujo la temperatura de compactación y se le incorporó 0.6% zeolita, es la que presentó propiedades más favorables. Estos resultados indican, que el efecto del micro espumado tras la incorporación de zeolita natural con porcentajes 0.6% a la mezcla asfáltica, efectivamente produjo un pequeño aumento de la densidad, aun cuando estas mezclas fueron compactadas a una temperatura de 25°C menos que la utilizada en la mezcla patrón.

Se puede inferir que la inclusión de zeolita en estas mezclas produjo una mejora en la trabajabilidad a través del micro espumado, aumentando el volumen del asfalto, envolvió en forma más efectiva las partículas de árido y provocó a su vez un mejor reacomodo de las

partículas ante los golpes del martillo compactador. Por otro lado, en la medida en que se aumenta el porcentaje de zeolita natural para las condiciones de diseño de este experimento, los resultados para 0.9 % de zeolita empieza a reducir la densidad para todos los contenidos de asfalto en referencia a la mezcla patrón (ver figura 7).

Fuente: Pincay, 2022.

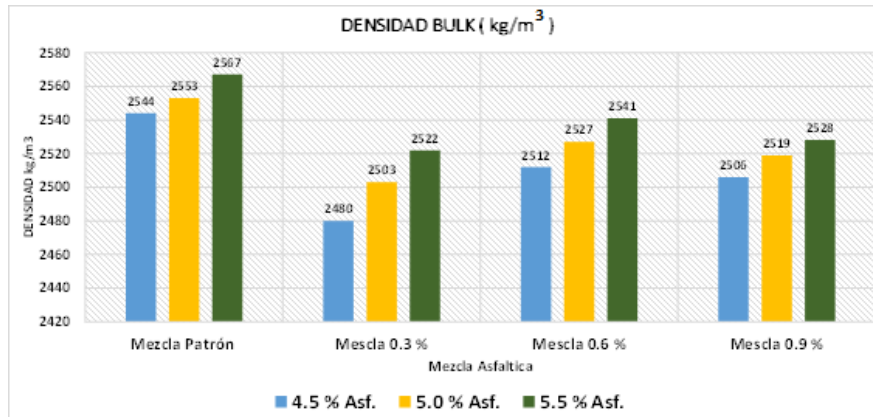


Figura 13: Densidad real compactada de la MAC Patrón y de las mezclas en caliente con incorporación de zeolita natural.

Con relación a la deformación experimentada por las mezclas (Figura 8), se demostró que no existen diferencias significativas entre los valores de fluencia y que la deformación mostrada en todas las mezclas está dentro del rango permitido por la normativa ecuatoriana para mezclas asfálticas densa, es decir, entre el 8% y 14%.

Fuente: Pincay, 2022.

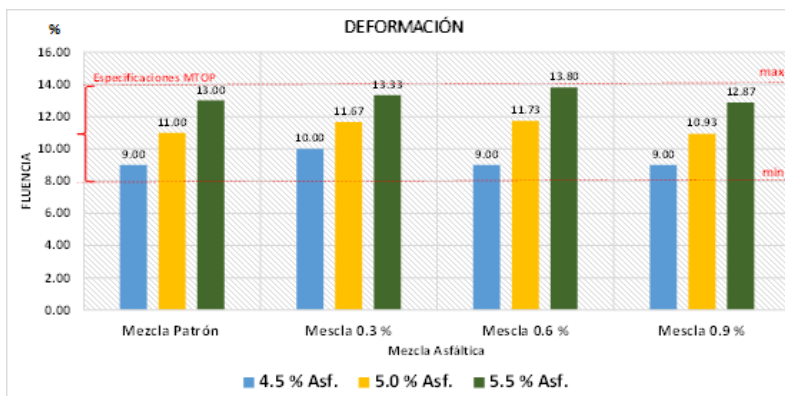


Figura 14: Fluencia de la mezcla Patrón y de las mezclas con incorporación de zeolita natural

En general, todas las mezclas presentaron más fluencia que la mezcla patrón y por ende se asume que son mezclas más flexibles y dúctiles. Esto puede deberse a que sufrieron menos oxidación por el hecho de haber sido mezcladas y compactadas a menor temperatura. En este sentido, la bibliografía indica que las mezclas que toleran altas deformaciones antes de alcanzar la falla resisten mejor los agrietamientos comparados con las mezclas que no toleran altas deformaciones (Breck, 1974).

Fuente: Pincay, 2022.

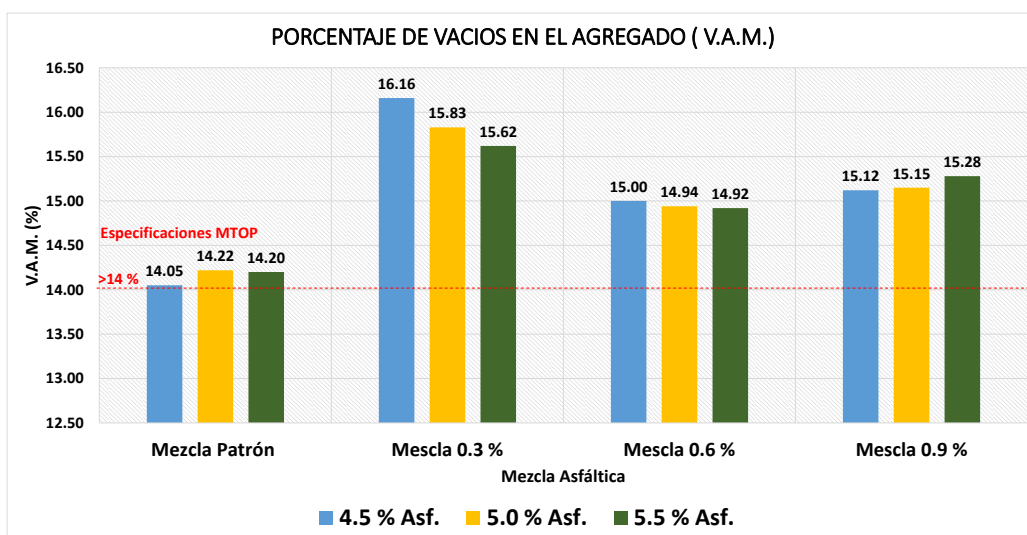


Figura 15: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral Patrón y de las mezclas con incorporación de zeolita natural.

Con relación a los resultados correspondientes (figura 9.) Porcentajes de vacíos en el agregado mineral en donde primeramente se aprecia que todas las mezclas presentaron valores por sobre el 14% exigido como mínimo por la normativa ecuatoriana para mezclas con árido pétreo de tamaño máximo nominal igual a 20 mm.

La mayor densidad mostrada por las mezclas con zeolita produjo que éstas presentaran una ligera disminución en los porcentajes de VAM. Así, las mezclas con 0,6% y 0.9 % de zeolita disminuyeron los vacíos en el agregado mineral, sin embargo, aún sigue mayor con respecto a la mezcla patrón.

Tanto para las mezclas con zeolitas en los porcentajes 0.3 %, 0.6% y 0.9 % cumplen con las exigencias de las normativas ecuatoriana para una mezcla densa donde los valores de vacíos de los agregados deben ser mayores de 14 %.

Fuente: Pincay, 2022.

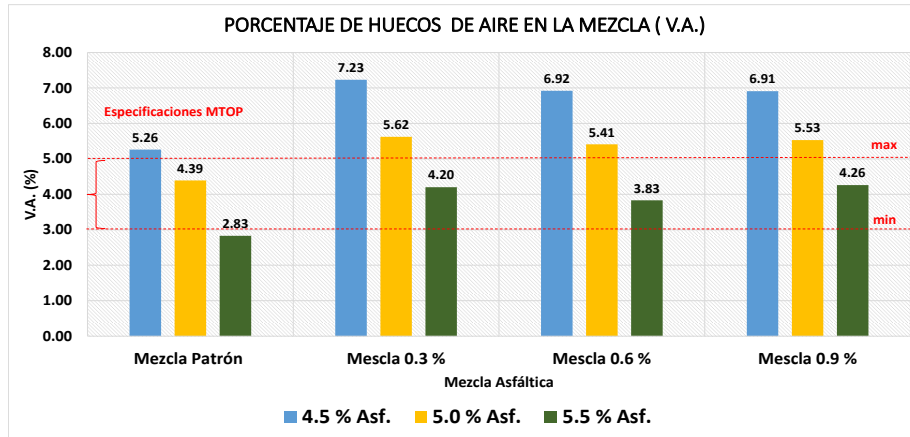


Figura 16: Porcentaje de huecos de aire en la mezcla Patrón y de las mezclas con incorporación de zeolita natural.

Los porcentajes de huecos de aire V_a , en las mezclas analizadas (Figura 10), son el reflejo de los resultados presentados para VAM y a su vez están en conformidad con la densificación obtenida. Con respecto a las especificaciones ecuatoriana donde el porcentaje de hueco donde establece que min 3 o máx. 5, podemos notar que para el porcentaje de mezcla con zeolita natural 0.3 %, 0.6 % y 0.9 % cumple, pero con el porcentaje óptimo de asfalto de 5.5 %.

Fuente: Pincay, 2022.

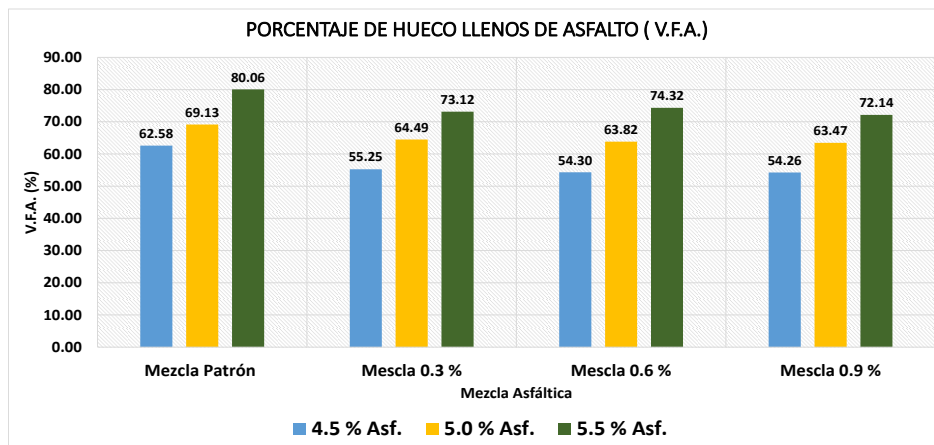


Figura 17: Porcentaje de huecos llenos de asfalto de la mezcla Patrón y de las mezclas con incorporación de zeolita natural.

En cuanto a los huecos llenos de asfalto (Figura 11), debido a que las mezclas analizadas presentaron densidades distintas, el espacio disponible para acomodar el contenido asfáltico también varía.

El cálculo del porcentaje de asfalto que es absorbido por el árido, se basa en las propiedades del agregado mineral (densidad real seca y densidad efectiva) y en la densidad del asfalto a 25 °C. Por lo tanto, dado que todas las mezclas contienen los mismos contenidos asfálticos y materiales, a excepción del reemplazo parcial de árido fino por zeolita, el porcentaje de asfalto absorbido por el agregado mineral debiera ser aproximadamente el mismo. Sin embargo, la menor temperatura de calentamiento de los áridos en las mezclas con zeolita podría haber ocasionado una menor absorción de asfalto por parte del agregado mineral en estas mezclas ya que las viscosidades del asfalto en la etapa de producción de las mezclas tibias y calientes, no es la misma. Esta situación eventualmente ocasionaría que el asfalto útil fuera ligeramente mayor en las mezclas con zeolita.

Fuente: Pincay, 2022.

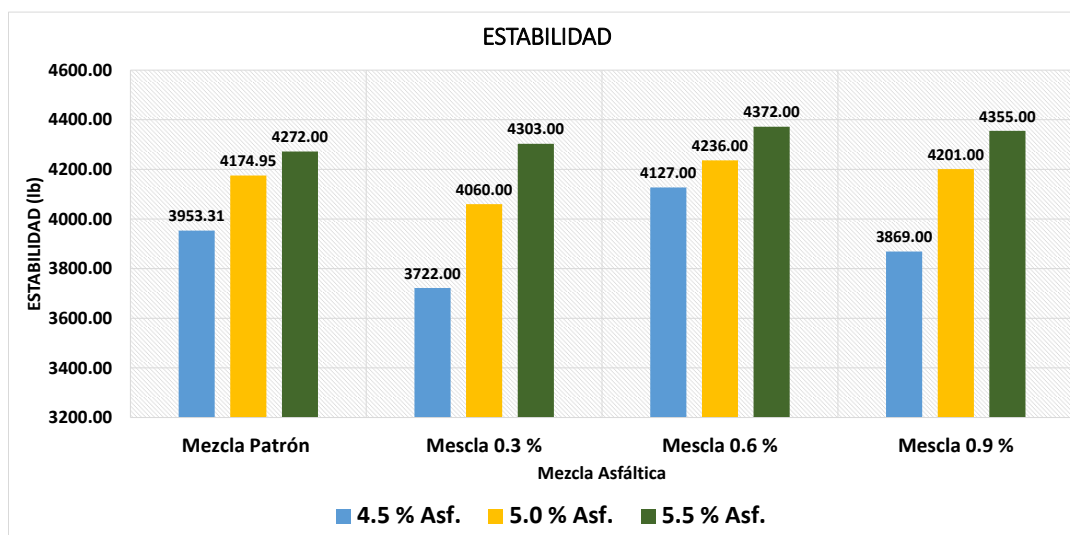


Figura 18: Estabilidad de la mezcla Patrón y de las mezclas con incorporación de zeolita natural. Fuente: Elaboración propia, 2022.

En lo concerniente a la estabilidad obtenida (Figura 12), las mezclas con incorporación de zeolita obtuvieron igual o mayor estabilidad que la mezcla patrón, no observándose en ellas los efectos de la disminución de las temperaturas de trabajo. La mezcla con un 0.6 % de zeolita presentó la estabilidad mayor que la mezcla patrón, incrementaron su resistencia a deformación, mientras que las mezclas con 0,3% y 0,9% tiene valores que se acerca a la mezcla patrón.

Así los resultados de la mezcla en caliente con incorporación de zeolita, en relación a la estabilidad, indican que el micro espumado inducido por la zeolita facilitó la cohesión de las partículas de árido aun cuando el árido fue calentado a una temperatura 30 °C menor que la mezcla patrón. El aumento del volumen del asfalto por acción del micro espumado, habría permitido en primera instancia un recubrimiento mayor del árido y luego, al disminuir el efecto del agua en el asfalto, el ligante disminuyó su volumen provocándose un efecto similar al aumento de viscosidad que a su vez habría cohesionado en forma más efectiva los áridos que ya estaban recubiertos por una película de asfalto.

El hecho de que la mezcla con un 0.9 % de zeolita haya empezado a disminuir con respecto a la mezcla del 0.6 % de zeolita, señalan que para contenidos de zeolita superiores a 0.6%, el efecto del micro espumado en relación al cohesionado de las partículas de árido pierde efectividad posiblemente por la presencia de agua remanente que podría afectar la adherencia del asfalto en la superficie del árido.

Las mezclas con zeolitas en los porcentajes 0.3 %, 0.6% y 0.9 % cumplen con las exigencias de las normativas ecuatoriana para una mezcla densa donde los valores de estabilidad deben ser mayores de 2200 lb.

Conclusiones

La incorporación de zeolita natural de clasificación Clinoptilolita-Mordenita permite reducir las temperaturas de mezclado y compactación de una mezcla asfáltica de graduación densa dado que produce un micro espumado capaz de aumentar el volumen de asfalto y facilitar la envoltura y cohesión de las partículas de agregado. Esta posibilidad quedó en evidencia tras la obtención de propiedades volumétricas y mecánicas iguales o mejores que las mezclas convencionales utilizadas como patrón de comparación.

En general, independientemente de la cantidad de zeolita incorporada y de las temperaturas de trabajo, las mezclas con zeolita obtuvieron mayores contenidos de huecos de aire, pero siempre dentro de los límites admisibles por la normativa ecuatoriana. Estos mayores contenidos de VA en las mezclas con zeolita pueden asociarse a mezclas de menor permeabilidad lo que asegura una menor exposición de la superficie asfáltica al agua y al oxígeno. Esta condición podría

disminuir posibles problemas de stripping causados por el agua y ralentizar los procesos de envejecimiento del asfalto.

Las mezclas con zeolita se presentaron muy levemente más deformables (casi similares) que la mezcla patrón, indicando que en general son más flexibles y eventualmente podrían presentar un mejor comportamiento ante fatiga y agrietamientos de origen térmico.

En cuanto a la estabilidad, el proceso realizado es de gran influencia en la mezcla asfáltica, ya que un buen recubrimiento de asfalto en el agregado pétreo interviene también en el acomodo adecuado de las partículas de agregado. Se puede inferir que el agua contenida en la zeolita, favoreció a un incremento del volumen del asfalto, por tal motivo la trabajabilidad de la mezcla mejoró resultando un mejor reacomodo de las partículas de árido ante los golpes del martillo compactador.

Los resultados de las propiedades volumétricas y mecánicas analizadas en las mezclas con zeolita, indican que estas mezclas siguen las tendencias generales en relación al comportamiento esperado de una mezcla asfáltica en caliente y a su vez los valores de las propiedades evaluadas se ajustan a las especificaciones requeridas por la normativa ecuatoriana. No obstante, la incorporación de zeolita a las mezclas permite variar, disminuir o aumentar algunas de las propiedades que caracterizan a la mezcla. Estos resultados a su vez indican la factibilidad técnica de confeccionar mezclas asfálticas en caliente con incorporación de zeolita natural ecuatoriana.

Las soluciones mostradas en la investigación contribuyen a reducir el impacto ambiental negativo que provocan los procesos constructivos desarrollados durante las labores de construcción o rehabilitación de las carreteras. Se recomienda estudiar en investigaciones futuras los períodos y temperaturas necesarias para efectuar un proceso eficiente de curado de mezclas que incorporen zeolita natural ecuatoriana.

Referencias

1. AASHTO-93. American Association of state Highway Transportation Officials –. Guide for design of pavement Structures. Washington D.C.
2. Annual Book of ASTM Standard, 4.03 Roofing and Paving Material; Vehicle Pavement System (2001)
3. Asphalt Institute. (2001). Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfálticas en caliente, . EE. UU.: Áspala Institute.

4. Association, E. A. (2010). The use of Warm Mix Asphalt EAPA position paper The use of Warm Mix Asphalt. EE.UU.: European Asphalt Pavement Association.
5. ASTM D3381 Especificación Para Clasificación por Grado de Viscosidad de Asfalto para la Construcción de Pavimentos. Norma Técnica Ecuatoriana.
6. ASTM D-113 AASHTO T51-00. MÉTODO PARA DETERMINAR LA DUCTILIDAD. <https://docplayer.es/87408611-Metodo-para-determinar-la-ductilidad-astm-d-113-aashto-t51-00.html>
7. ASTM D5-06, Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, American Society for Testing and Materials, USA.
8. ASTM D 2042 – 09. Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethy. <https://pdfcoffee.com/astm-d-2042-09-standard-test-method-for-solubility-of-asphalt-materials-in-trichloroethylene-pdf-free.html>
9. Barrera, J. (2017). Análisis del comportamiento de mezclas asfálticas con incorporación de zeolita natural chilena en reemplazo parcial de árido fino. <http://repositoriobibliotecas.uv.cl/handle/uvsc/2734>
10. Breck, D. W. (1974). Zeolite Molecular Sieves. Chemistry, and Use: Wiley.
11. Bueche, N. (s/f.). Warm Asphalt Bituminous Mixtures with regards to energy, emissions and performance. Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Road Transport Conference, Session 8.
12. Curi, A. G. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. Scielo, 17(6), 111-118. doi: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642006000600017>
13. D4402/D4402M. Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. <https://qdoc.tips/astm-d4402-pdf-free.html>
14. Dirección de Vialidad, MOP. (2017). Manual de Carreteras, Volumen 8, Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control. Santiago de Chile: MOP Chile.
15. Galáz, S. (2011). Efecto de la incorporación de zeolita natural chilena en la temperatura de producción de mezclas asfálticas. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.

16. Galeas, B., & Suquillo, C. (2021). Diseño de mezcla asfáltica tibia, mediante la utilización de asfalto espumado, aplicando la metodología Marshall. Quito: Universidad Central del Ecuador.
17. Hernández, R. y Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGrawHill.
18. INV E – 724 – 13. Índice de penetración de los cementos asfálticos. Instituto Nacional de Vías Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-724-13.pdf>
19. Larsen, O. (2001). Warm Asphalt Mix with Foam – WAMFoam. Kolo Veidekke.
20. Loren, P., Mardones, L., Valdes, G., Calabi, A. y Sánchez, E. (2018). Evaluación de la durabilidad a fatiga de mezclas semicalientes con adición de zeolita natural y RAP. <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/article/view/2004/1795>
21. Manual de Carreteras (2014). Especificaciones Técnicas generales para Construcción. SBN: 978 – 612 - 304 – 116 – 8
22. Ministerio de Transporte y Obras Publicas del Ecuador (2013). Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12-MTOP. Quito, Ecuador.
23. Moll, R., Alonso, A. y González, M. (2017). Mezclas asfálticas de bajo impacto ambiental para la rehabilitación de las carreteras en Cuba. <https://cutt.ly/7Fuht0k>
24. Newcomb, D. (2007). An introduction to Warm Mix Asphalt, National Asphalt Pavement Association. E.E.U.U: National Asphalt Pavement Association.
25. NORMA ASTM D95. Método de prueba estándar para el Agua en productos derivados del petróleo y materiales bituminosos por destilación. <https://pdfcoffee.com/astm-d95-7-pdf-free.html>
26. ASTM - D92 – 97. Método de ensayo estándar para la determinacion del punto de inflamacion mediante copa abierta cleveland. <https://pdfcoffee.com/astm-d92pdf-2-pdf-free.html>
27. Vaitkus, A., Cygas, D., Laurinavicius, A. & Perveneckas, Z. (2009). Analysis and evaluation of possibilities for the use of Warm Mix Asphalt in Lithuania. EE.UU.: Vilnius Gediminas Technical University.
28. Zaumanis, M. (2010). Warm Mix Asphalt Investigation, Master of Science Thesis, Department of Civil Engineering. Dinamarca: University of Denmark, Kongens Lyngby.

29. Zeonatec (2022). Ficha técnica del producto. <https://www.zeonatec.com/>

© 2022 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).