

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN  
EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON VIDRIO TEMPLADO  
MOLIDO POR MEDIO DE LA METODOLOGÍA MARSHALL



Por:

Edwin Fernando Vanegas Manrique

Laura Inés Segura Calleja



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2021

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN  
EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON VIDRIO TEMPLADO  
MOLIDO POR MEDIO DE LA METODOLOGIA MARSHALL

Por:

Edwin Fernando Vanegas Manrique

Laura Inés Segura Calleja

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título profesional de Ingeniero Civil

Aprobado por:

I.C. Jessica María Ramírez Cuello, M.Sc.

Director

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2021

**Autoridades Académicas**

**P. JOSE GABRIEL MEZA ANGULO, O.P.**

Rector General

**P. EDUARDO GONZÁLEZ, O.P.**

Vicerrector Académico General

**P. JOSÉ ANTONIO BALAGUERA CEPEDA, O.P.**

Rector Sede Villavicencio

**P. RODRIGO GARCÍA JARA, O.P.**

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

**ESP. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN**

Secretaria de División Sede Villavicencio

**ING. MANUEL EDUARDO HERRERA PABÓN**

Decano Facultad de Ingeniería Civil

**Nota De Aceptación**

---

---

---

---

---

**MANUEL EDUARDO HERRERA PABÓN**

Decano de Facultad

---

**JESSICA RAMÍREZ CUELLO**

Director Trabajo de Grado

---

**ERIKA LORENA BECERRA BECERRA**

jurado

Villavicencio, junio de 2021

### **Dedicatoria**

Este trabajo está dedicado primero que todo a Dios y luego a todas las personas que me han sido un apoyo incondicional en primer lugar mi madre por estar en esos momentos difíciles y mi familia que siempre ha estado presente.

*Edwin Vanegas Manrique*

En primer lugar, se lo dedico a Dios por permitirme alcanzar un logro más, a mis padres Williams Segura y Helena Calleja, a mis hermanos que siempre han estado conmigo siendo un gran apoyo en cualquier etapa de mi vida.

*Laura Segura Calleja*

### **Agradecimientos**

Le damos gracias Dios por la oportunidad de terminar nuestros estudios y darnos la sabiduría de llevar a cabo cada proyecto propuesto. A nuestros padres por ser un apoyo incondicional a lo largo nuestras vidas por ser una guía y un ejemplo a seguir.

A la ingeniera Jessica Ramírez Cuello directora de nuestra tesis de investigación por brindarnos su experiencia y tiempo para la realización del trabajo, a nuestra evaluadora la ingeniera Erika Lorena Becerra por ser una guía para concluir nuestro proyecto, al personal de laboratorio de pruebas y ensayos de la universidad Santo Tomás sede Villavicencio por permitirnos hacer uso de las instalaciones y equipos necesarios para nuestra investigación.

## Contenido

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Resumen .....                                                                                          | 12 |
| Abstract .....                                                                                         | 13 |
| Introducción .....                                                                                     | 14 |
| Formulación del Problema .....                                                                         | 15 |
| Objetivos .....                                                                                        | 16 |
| Objetivo general .....                                                                                 | 16 |
| Objetivos específicos .....                                                                            | 16 |
| Justificación.....                                                                                     | 17 |
| Estado del arte.....                                                                                   | 18 |
| Vidrio templado (VT) .....                                                                             | 18 |
| Metodología.....                                                                                       | 26 |
| Recolección de material .....                                                                          | 28 |
| Granulometría de vidrio templado.....                                                                  | 30 |
| Resistencia a la degradación de los agregados por medio de la máquina de los ángeles INV E-218-13..... | 31 |
| Granulometría de agregados INV E-213-13.....                                                           | 31 |
| Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (método del picnómetro) INV E-707-13.....     | 32 |
| Penetración de los materiales bituminosos INV E-706-13 .....                                           | 33 |
| Punto de inflamación y de combustión mediante la copa abierta Cleveland INV E-709-13.....              | 34 |
| Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional INV E-717.13 .....     | 35 |
| Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) INV E-712-13               | 36 |
| Ensayo Marshall (contenido óptimo de asfalto) INV E-748-13 .....                                       | 37 |
| Resultados .....                                                                                       | 40 |
| Caracterización física de agregados pétreos y asfalto .....                                            | 40 |
| Determinación de contenido óptimo de asfalto .....                                                     | 40 |
| Ensayo Marshall con mezcla Asfáltica modificada con VTM .....                                          | 42 |
| Diseño Shell mezcla asfáltica convencional .....                                                       | 44 |
| Diseño Shell mezcla modificada con VTM .....                                                           | 46 |
| Conclusiones.....                                                                                      | 49 |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| Recomendaciones .....           | 50 |
| Referencias bibliográficas..... | 51 |

**Lista de tablas**

|                                                                                                     | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1. Estado de arte .....                                                                       | 18   |
| Tabla 2. Metodología .....                                                                          | 27   |
| Tabla 3. Distribución de material granular para cada porcentaje de asfalto .....                    | 37   |
| Tabla 4. Caracterización del asfalto .....                                                          | 40   |
| Tabla 5. Datos contenido óptimo de asfalto 4.5 y 5% .....                                           | 41   |
| Tabla 6. Datos contenido óptimo de asfalto 5.5 y 6 % .....                                          | 41   |
| Tabla 7. Determinación de contenido optimo asfalto .....                                            | 42   |
| Tabla 8. porcentaje de VTM y gravedad especifica bulk .....                                         | 43   |
| Tabla 9. porcentaje de VTM y gravedad especifica bulk. ....                                         | 43   |
| Tabla 10. Datos obtenidos Metodología Shell .....                                                   | 44   |
| Tabla 11. Código de mezcla convencional .....                                                       | 44   |
| Tabla 12. Datos para Diseño metodología Shell .....                                                 | 44   |
| Tabla 13. Distribución de espesor de pavimento .....                                                | 45   |
| Tabla 14. Datos obtenidos metodología Shell (VTM) .....                                             | 46   |
| Tabla 15. Código de mezcla modificada con VTM .....                                                 | 46   |
| Tabla 16. Datos de diseño metodología Shell (VTM) .....                                             | 46   |
| Tabla 17 Distribución de espesores de pavimento con VTM .....                                       | 47   |
| Tabla 18. Comparación de mezclas asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada con VTM ..... | 48   |

**Lista de Figuras**

|                                                                                | Pág. |
|--------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1.Recolección de material pétreo .....                                  | 29   |
| Figura 2. Planta de asfalto PASOLIN .....                                      | 29   |
| Figura 3.Trituración manual de VTM .....                                       | 30   |
| Figura 4. Granulometría de VTM .....                                           | 30   |
| Figura 5. Desgaste Maquina de los Ángeles .....                                | 31   |
| Figura 6. Granulometría de agregados .....                                     | 32   |
| Figura 7. Densidad material bituminoso .....                                   | 33   |
| Figura 8. Penetración y Baño maría a 25°C .....                                | 34   |
| Figura 9. Punto de inflamación .....                                           | 35   |
| Figura 10. Viscosidad del asfalto .....                                        | 36   |
| Figura 11. Punto ablandamiento (Anillo y bola) .....                           | 37   |
| Figura 12. Método Marshall .....                                               | 38   |
| Figura 13. Peso de los especímenes sumergidos en el agua .....                 | 38   |
| Figura 14. Diagrama Fuerza vs Deformación, mezcla asfáltica convencional ..... | 40   |
| Figura 15. Diagrama Fuerza vs Deformación .....                                | 42   |
| Figura 16 Carta HN 50 .....                                                    | 45   |
| Figura 17. Diseño de pavimento método Shell .....                              | 45   |
| Figura 18. Carta HN 50 .....                                                   | 47   |
| Figura 19. Diseño de pavimento método Shell .....                              | 47   |

## Glosario

**Pavimento:** Conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la Subrasante de una vía y deben resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el período para el cual fue diseñada la estructura y el efecto degradante de los agentes climáticos.

**Pavimento flexible:** Tipo de pavimento constituido por una capa de rodadura bituminosa apoyada generalmente sobre capas de material no ligado.

**Asfalto:** Material cementante, de color marrón oscuro a negro, constituido principalmente por betunes de origen natural u obtenidos por refinación del petróleo. El asfalto se encuentra en proporciones variables en la mayoría del crudo de petróleo

**Fatiga:** Reducción gradual de la resistencia de un material debido a sollicitaciones repetidas

**Penetración:** Sistema de Clasificación de los cementos asfálticos basado en la penetración a una temperatura de 25°C. Existen grados patrones de clasificación tales como: 40-50, 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300.

## Resumen

Las mezclas asfálticas en los pavimentos, son sometidas diariamente a diferentes cargas vehiculares y cambios climáticos, dando origen a deformaciones u otros daños, por lo cual se considera necesario modificar algunas propiedades con la adición de diferentes materiales que garanticen mayor vida útil y reducción en actividades de mantenimiento en las capas asfálticas.

Este proyecto de investigación pretende diseñar una mezcla asfáltica modificada con vidrio templado molido (VTM) por vía seca teniendo en cuenta la metodología MARSHALL, realizando ensayos de laboratorio donde será reemplazado dosificaciones de 10%, 20% y 30% de agregado por VTM lo cual nos permitirá evaluar el desempeño de una mezcla asfáltica modificada en comparación a una mezcla asfáltica convencional.

Con base en los resultados obtenidos del laboratorio se procede a establecer si al reemplazar un porcentaje de agregado por VTM se evidencian mejoras respecto a las propiedades brindadas de una mezcla asfáltica convencional cuando es sometida a niveles elevados de tránsito y agente climáticos.

El tamaño del agregado que se reemplazaría en la mezcla por el VTM, tendría lugar al mayor porcentaje retenido al realizar la granulometría.

De lo anterior resulto una mezcla asfáltica modificada con VTM con propiedades similares a la convencional en cuanto al diseño de la estructura del pavimento, pero mejorando las características de estabilidad de la misma lo cual garantiza menores deformaciones en la capa de rodadura.

**Palabras Clave:** asfalto, materiales, mezclas, pavimentos.

### **Abstract**

Asphalt mixtures in pavements are subjected daily to different vehicular loads and climatic changes, giving rise to deformations or other damages, so it is considered necessary to modify some properties with the addition of different materials to ensure longer life and reduction in maintenance activities in the asphalt layers.

This research project aims to design a modified asphalt mixture with ground tempered glass (TMV) using the MARSHALL methodology by performing laboratory tests where 10%, 20% and 30% of aggregate will be replaced by TMV, which will allow us to evaluate the performance of a modified asphalt mixture compared to a conventional asphalt mixture.

Based on the results obtained from the laboratory, we will proceed to establish whether replacing a percentage of aggregate with TMV will show improvements with respect to the properties provided by a conventional asphalt mix when subjected to high levels of traffic and climatic agents.

The size of the aggregate that would be replaced in the mix by the VTM would result in the highest percentage retained in the particle size.

The result is an asphalt mix modified with VTM with similar properties to the conventional mix in terms of pavement structure design, but improving its stability characteristics, which guarantees lower deformations in the wearing course.

Key words: asphalt, materials, mixes, pavements.

## **Introducción**

La infraestructura vial es un componente de vital importancia para el impulso económico de un país. En Colombia la relevancia de las vías es mayor, ya que el principal modo de transporte tanto de carga, como de pasajeros es el terrestre. A pesar de esto y de acuerdo con el informe de indicadores del sector del transporte en Colombia (Yepes et al., 2013), existe un atraso importante de la infraestructura vial (y de otros medios de transporte), el cual es debido por la geografía del país que generan restricciones que dificultan la construcción y mantenimiento de la red vial.

Pese a la existencia de normatividad en el país para la preparación de mezclas asfálticas, el uso de materiales y tecnologías de reciclaje en la rehabilitación y mantenimiento vial requiere mayor profundidad en la investigación de nuevos materiales para evitar la extracción de los recursos no renovables, por ese motivo el presente documento aborda el tema de mezcla asfáltica modificada con vidrio templado molido con el fin de comparar con una mezcla asfáltica convencional, empleando la metodología MARSHALL para la elaboración de briquetas y el método SHELL para el diseño del pavimento.

### **Formulación del Problema**

Colombia cuenta con una red vial de 11576,92 Km, donde el 80,36% de carreteras pavimentadas se encuentran con un porcentaje del 47,94% en mal estado (INVIAS, 2020), con la adición de algunos productos al asfalto, se modifican las propiedades físico-mecánicas, químicas y reológicas de las mezclas asfálticas, aumentando la vida útil del pavimento y disminuyendo diferentes fallas que pueden presentar en su tiempo de servicio (Rondon, 2016). En la actualidad las mezclas asfálticas modificadas son poco implementadas en los pavimentos, dado que tiene que cumplir con la normativa vigente en Colombia y sus especificaciones, Por esto, es de interés que en este trabajo se estudie una alternativa que mejore una mezcla asfáltica convencional al agregar VTM dándole también una opción de reutilización puesto que se cree que no todos los productos de vidrio son reciclables como es el caso de ventanas, ampolletas, tubos fluorescentes, vidrio templado, entre otros (Sepulveda, 2020), arrojados a los rellenos sanitarios generando contaminación innecesaria (Vélez & Restrepo, 2010) entonces, ¿sería más viable extraer un recurso natural o reutilizar un material no reciclable?.

Se debe tener en cuenta que los recursos naturales en algún momento llegaran a ser limitados de tal manera que se debe optar por darle un uso a elementos que finalizaron su vida útil para el caso de esta investigación se elige el vidrio templado molido.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Diseñar una mezcla asfáltica modificada con vidrio templado molido (VTM) por medio de la metodología MARSHALL.

### **Objetivos específicos**

- Reemplazar un 10%,20% o 30% de agregado que contiene la mezcla asfáltica por VTM teniendo en cuenta el tamaño resultante de la trituración.
- Comparar el comportamiento de la mezcla asfáltica convencional con la modificada.
- Establecer las ventajas de la implementación del VTM en una mezcla asfáltica.

## **Justificación**

Colombia cada vez crece más en infraestructura vial trayendo desarrollo a cualquier parte, impulsando a nosotros como futuros ingenieros a investigar y brindar nuevas alternativas que mejoren la calidad de los materiales ya existentes.

El asfalto es un producto que procede de elementos pétreos, este material es muy importante e idóneo para la ejecución de carreteras, se caracteriza por ser adherente, impermeable, cohesivo y el ser capaz de resistir altas cargas producidas por el tránsito. En este trabajo pretendemos obtener una comparación de la caracterización física de una mezcla convencional con una mezcla la cual será modificada con VTM, este es un material muy utilizado en la actualidad ya que se caracteriza por ser resistente, su aprovechamiento se evidencia en sectores como construcción, industria de automotores e incluso en algo tan básico como protección de celulares, por ende se obtiene fácilmente del reciclaje ayudando así al medio ambiente y brindando una manera diferente para la reutilización de este material.

El vidrio templado se elabora de dos maneras distintas: templado químico el cual es sumergido en un baño de sales a una temperatura aproximadamente de 450°C produciendo un cambio de iones (Glasstek, 2017) y templado térmico, este es sometido a altas temperaturas que pueden variar entre los 550°C y 650°C donde llega a su punto de ablandamiento, luego es sometido de manera abrupta a enfriamiento, quedando expuesto en su superficie a compresión y en su interior a tracción brindándole mucha resistencia comparada con un vidrio sin tratar (Infante, 2015).

Por lo anteriormente mencionado se estudiará la modificación de un asfalto con vidrio templado para posiblemente mejorar las propiedades brindadas de una mezcla asfáltica convencional cuando es sometida a niveles elevados de tránsito y agente climáticos, que sea una alternativa viable, económica y amigable con el medio ambiente.

## Estado del arte

### Vidrio templado (VT)

El vidrio es un producto que se obtiene al someter un vidrio sin procesar a una variación térmica donde se calienta a una temperatura aproximadamente de 700 °C, para posteriormente sufrir un brusco enfriamiento de su superficie soplando aire frío a presión controlada sobre sus caras hasta que su temperatura no sea mayor a 30° C. Entre sus características encontramos que tiene mayor resistencia mecánica a la compresión y a flexión, supera cinco veces a la resistencia a la flexión de los vidrios no tratados, tiene mayor resistencia a la torsión y al impacto (Nova, 2010).

La producción de vidrio en Colombia según estudios realizados se representa en cuatro eslabones principales los cuales son: de envases con un 34,45%, vidrio templado 17,9%, plano 14,44% y para laboratorio y farmacia 14,04%. En la actualidad los únicos que tienen proceso de reciclaje son los denominados vidrios domésticos como frascos, botellas, vasos, vajillas y decoración entre otros, por consiguiente, más del 35% no es reutilizado, formando parte de los rellenos sanitarios del país generado un exceso de residuos que acelera la búsqueda de lotes con mayor capacidad (Velez & Restrepo, 2010).

A lo largo de las últimas décadas, la modificación de mezclas asfálticas con diferentes residuos de materiales, ha logrado evidenciar mejoras en el comportamiento físico y reológico de las mismas, como se muestra a continuación;

*Tabla 1. Estado de arte*

| FECHA | AUTOR                                                                      | TÍTULO                                                                                                             | TIPO DE DOCUMENTO                 | DESCRIPCIÓN                                                                                                                                                                               |
|-------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2017  | Umbarila, Cristian<br>Andrés Mejía<br>Hernández, Cristian<br>Adolfo sierra | estado del arte de mezclas asfálticas modificadas en los últimos 10 años: caso de estudio universidades de Bogotá. | Proyecto de investigación (TESIS) | Investigaciones que han desarrollado las instituciones de educación superior de la ciudad de Bogotá durante los últimos diez años en el área de asfaltos.<br>(UMBARILA & HERNÁNDEZ, 2017) |

Tabla 1. Continuación.

|      |                                                                                      |                                                                                                                                                                                                               |                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2018 | Javier Flórez<br>Sánchez<br>Sergio<br>Leonardo<br>Gómez Páez<br>Néstor Edgar<br>Cely | Caracterización física<br>y reológica del asfalto<br>modificado con aceite<br>de coco                                                                                                                         | Proyecto<br>de investigación<br>(TESIS) | Se enfoca en evaluar las<br>características físicas y<br>reológicas de una<br>muestra de asfalto<br>de modificado con aceite de<br>coco en diferentes<br>concentraciones y<br>realizar una comparación<br>con las mezclas<br>convencionales. (Florez<br>et al., 2018)                             |
| 2018 | Ochoa R.<br>Grimaldo<br>León, G.E.<br>Orjuela<br>Fajardo, M.<br>Muñoz León,<br>C.    | Analysis of use of<br>granulated slag in<br>asphalt mixtures<br>manufacturing for<br>pavements [Análisis<br>del uso de escoria<br>granulada en la<br>fabricación de mezclas<br>asfálticas para<br>pavimentos] | Artículo                                | Se desea comparar una<br>mezcla tradicional tipo<br>MDC-19 del INVIAS con<br>cemento asfáltico de<br>grado de penetración<br>80/100 y otra mezcla de<br>la misma tipología<br>modificada con escoria<br>granulada como sustituto<br>de la fracción del árido de<br>arena. (Ochoa et al.,<br>2018) |
| 2020 | Forero<br>Triana,<br>Mayra<br>Alejandra<br>Hernández<br>Franco,<br>Johan Andrés      | Diseño Marshall y<br>verificación de<br>adherencia de una<br>mezcla asfáltica<br>MDC25 con reemplazo<br>parcial de material<br>granular por ceniza de<br>cascarilla de arroz                                  | Proyecto<br>de investigación<br>(TESIS) | Se propone una<br>alternativa de utilización<br>de la ceniza de cascarilla<br>de arroz para<br>modificador el material<br>granular en una mezcla<br>asfáltica MDC-25 (Forero<br>& Hernández, 2020)                                                                                                |

Tabla 1. Continuación.

|      |                                                                                                  |                                                                                                                                                                  |                                   |    |                                                                                                                                                                                  |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2020 | Vaquiro Díaz, Ronaldo Alexis Padilla Lozano, Ervin Felipe                                        | Evaluación del comportamiento en una mezcla asfáltica densa en caliente (MDC-19) con cemento de uso general como agente modificante.                             | Proyecto de investigación         | de | Evaluar el comportamiento de las resistencias de un tipo de mezcla asfáltica densa en caliente (MDC-19) reemplazando el contenido de finos por cemento.(Vaquiro & Padilla, 2020) |
| 2020 | Lizcano Garzón, Omar Ramos Félix, Deyber Andrés                                                  | estudio del comportamiento físico-mecánico de mezclas asfálticas modificadas con llenante mineral de ceniza de la cascarilla resultante de la molienda del arroz | Trabajo grado                     | de | Este trabajo consiste en mejorar de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica modificada con ceniza de residuos de la molienda del arroz (Lizcano & Ramos, 2020)          |
| 2017 | Vanegas Miranda, Juan Diego Caro Spinel, Silvia Caicedo Hormaza, Bernardo Estrada Mejía, Nicolás | Caracterización mecánica de una mezcla asfáltica modificada con fibras sintéticas                                                                                | Proyecto de investigación (TESIS) |    | La finalidad es caracterizar el comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con fibras sintéticas con diferentes porcentajes (Vanegas et al., 2017)                        |

Tabla 1. Continuación.

|      |                                |                                                                                                                                                                                                                                                           |                                   |                                                                                                                                                             |
|------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2018 | Jaramillo, Tatiana Marín       | Analysis of Construction Specifications of Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS) and Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá (IDU) according to the explicit quality equirements for materials in the pavement design methods used in Colombia | Trabajo de grado                  | Comparan especificaciones de construcción vial del Instituto Nacional de Vías de Colombia y del Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá. (Jaramillo, 2018) |
| 2019 | Suarez Tirado, Alexander       | Análisis monotónico de mezclas densas en caliente con asfalto modificado con 50% de caucho y 50% de cuero                                                                                                                                                 | Proyecto de investigación (TESIS) | Este trabajo pretende brindar alternativas de modificación de las Mezclas asfálticas densas en Caliente (Suarez, 2019)                                      |
| 2016 | Rondón Quintana Hugo Alexander | Pavimentos: materiales, construcción y costos                                                                                                                                                                                                             | Libro                             | Este documento indica aspectos importantes para el diseño y construcción de pavimentos para carreteras y vías urbanas (Rondon, 2016)                        |

Tabla 1. Continuación.

|      |                                                          |                                                                                                                                                                               |                                   |                                                                                                                                                                                                                                      |
|------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2016 | Diana Teresa Fernández Ttito                             | Análisis del comportamiento físico - mecánico de una mezcla asfáltica en caliente modificada con GCR (grano de caucho reciclado) a partir de neumáticos en desuso, cusco 2016 | documento sitio web (tesis)       | En este documento se analiza el comportamiento físico – mecánico de una Mezcla Asfáltica en caliente modificada con Grano de Caucho Reciclado (GCR) a partir de neumáticos en desuso.                                                |
| 2017 | César Mauricio Díaz Caros, Liliana Carolina Castro Celis | Implementación del grano de caucho reciclado (GRC) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá            | Monografía de grado               | Sintetiza diferentes investigaciones a nivel internacional donde se demuestra que la implementación del GCR en los pavimentos es una alternativa para solucionar problemas de tipo mecánico en los pavimentos. (Díaz & Castro, 2017) |
| 2020 | Paula Yineth Cabezas López                               | Caracterización física de un ligante asfáltico 60/70 modificado con desechos de polietileno de alta densidad (D-PEAD)                                                         | Proyecto de investigación (TESIS) | Este trabajo investigativo se centró en evaluar las características físicas de un asfalto 60/70 modificado con desechos de polietileno de alta densidad. (Cabezas, 2020)                                                             |

Tabla 1. Continuación.

|      |                                                                                |                                                                                                                                  |                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2019 | Borja Torres<br>Stalin<br>Alberto,<br>Cárdenas<br>Castillo Joffre<br>Alexander | Caracterización de mezclas asfálticas en caliente, elaboradas con el uso de cemento asfáltico modificado con polímero SBR y SBS. | Proyecto de investigación (TESIS) | analiza y compara el comportamiento de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico modificado con diferentes porcentajes de polímero SBS (Estirenobutadieno-estireno) y SBR (Estireno butadieno) y una mezcla asfáltica convencional (Borja & Cárdenas, 2019)                                                      |
| 2015 | Elmer<br>Rodrigo<br>Aranguren<br>Campos                                        | Caracterización de una mezcla asfáltica empleando alquitrán, escoria granulada y agregado de caliza                              | Proyecto de investigación (TESIS) | Plantea una alternativa de mezcla asfáltica, incorporando materiales no convencionales como son el alquitrán de hulla a manera de ligante, escoria granulada como agregado fino y caliza como agregado grueso, hace una breve descripción de las principales características y propiedades de las mezclas asfálticas (Aranguren, 2015) |

Tabla 1. Continuación.

|      |                                                                                      |                                                                                                                                             |                                   |                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2018 | Martínez, G;<br>Caicedo, B;<br>González, D;<br>Celis, L;<br>Fuentes, L;<br>Torres, V | Trece años de desarrollo continuo en mezclas de asfalto modificado con caucho granulado en Bogotá: Logrando la sostenibilidad del pavimento | Articulo                          | Este artículo describe las diferentes etapas que ha abordado el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) para lograr la adecuada y correcta aplicación de mezclas asfálticas modificadas con caucho granulado (CRM).(Martinez et al., 2018)          |
| 2019 | Mario Alejandro Alvarado Guzmán, Andrés Felipe Ayala Tamara                          | Estudio de mezclas asfálticas recicladas modificadas con diferentes porcentajes (TESIS) de weo (wa)                                         | Proyecto de investigación         | En este trabajo se analizó la alternativa del uso de aceite quemado de motor de carro (WEO- Waste de Engine Oil) como rejuvenecedor del concreto asfáltico, especialmente de la propiedad ligante del asfalto.(Alvarado & Ayala, 2018)           |
| 2018 | Karlenn Nicol Freire Alvear                                                          | Uso de vidrio molido en las mezclas asfálticas, con el propósito de reducir la contaminación                                                | Proyecto de investigación (TESIS) | Este trabajo tiene como base la realización de una mezcla asfáltica con adición de vidrio molido, obteniendo resultados mecánicos y de costos para determinar si es factible la implementación de este método en nuestra realidad.(Freire, 2018) |

Tabla 1. Continuación.

|      |                                                                               |                                                                                                                                                    |                                         |                                                                                                                                                                                                                        |
|------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2020 | Melendrez<br>Caucha<br>Jidalte,<br>Pinedo<br>Pinedo<br>Wilson Ángel           | Efecto del vidrio<br>molido reciclado en la<br>elaboración de mezcla<br>asfáltica en caliente,<br>utilizando agregados de<br>la cantera La Soledad | Proyecto de<br>investigación<br>(TESIS) | este trabajo es tipo<br>experimental, elaboraron<br>la mezcla asfáltica en<br>caliente con la<br>incorporación del vidrio<br>molido reciclado                                                                          |
| 2018 | Jairo<br>Hernando<br>Díaz Giraldo,<br>Álvaro<br>Ricardo<br>Bonilla<br>Murillo | Modificación de<br>mezclas asfálticas<br>mediante fibras de<br>vidrio listas para<br>instalar                                                      | Proyecto<br>de investigación<br>(TESIS) | Este trabajo se realizó<br>de con el fin de conocer los<br>efectos de la aplicación de<br>la fibra de vidrio en una<br>mezcla asfáltica en frío                                                                        |
| 2018 | Gutiérrez<br>Silvestre Abel<br>Andréi                                         | Asfaltos modificados<br>con vidrio y su<br>comparación técnica y<br>económica con los<br>asfaltos convencionales.                                  | Proyecto<br>de investigación<br>(TESIS) | objetivo de este trabajo<br>fue determinar las<br>diferencias técnico y<br>de económico entre los<br>asfaltos modificados con<br>vidrio y los asfaltos<br>convencionales-<br>Huancayo (Silvestre &<br>Gutierrez, 2018) |

## Metodología

La investigación es con un enfoque mixto, inicialmente se realizó una búsqueda de información relacionada con los métodos de diseño para mezclas asfálticas donde se encuentran los manuales INVIAS (INVIAS, 2013) y el libro Pavimentos: materiales, construcción y costos (Rondon, 2016). Además, se recopiló información relacionada con mezclas asfálticas y material agregado para su modificación.

El tipo de mezcla asfáltica que se utiliza es la continua, la cual incluye 3 tipos de material granular grueso, medio y fino donde se encontraran en canteras ubicadas en la ciudad de Villavicencio.

La idea es reemplazar un porcentaje de uno de estos agregados pétreos por un material que se pueda reutilizar, para este caso se adoptó vidrio templado ya que es un material contaminante para el medio ambiente.

Para el diseño de la mezcla asfáltica se opta por la metodología Marshall incluyendo los siguientes ensayos de laboratorio:

- Densidad (Normas INV E-733-13 e INV E-734-13)
- Diseño Marshall, INV. E-748-13.
- Granulometría del agregado pétreo, INV. E-782-13.
- Gravedad específica medido (método Rice) (Norma INV E-735-13).
- Contenido de asfalto (Norma INV E-732-13).
- Estabilidad y flujo de mezcla asfáltica en caliente empleando el equipo Marshall (Norma INV E-748-13).

Se realizan estos ensayos con el fin de cumplir los requerimientos que debe tener una mezcla asfáltica.

Tabla 2. Metodología

| OBJETIVO                                                                                                                                | ACTIVIDAD                                                                                         | DESCRIPCIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | ACTORES                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Reemplazar un porcentaje de agregado que contiene la mezcla asfáltica por VTM teniendo en cuenta el tamaño resultante de la trituración | Recolección de materiales                                                                         | Se deben recolectar 3 tipos de material granular proveniente de la cantera Guayuriba del sector de Villavicencio para la realización de una mezcla asfáltica convencional, posteriormente se reemplazará un porcentaje de un material pétreo por VTM para obtener una mezcla asfáltica modificada.                                                                                             | Canteras en el sector de Villavicencio.<br><br>Empresas independientes de vidrio templado                                |
| Comparar el comportamiento de la mezcla asfáltica convencional con la modificada.                                                       | metodología Marshall<br>Densidad (Normas INV E-733-13 e INV E-734-13)<br>Gravedad específica bulk | Se diseñará la mezcla asfáltica por vía seca se tendrá en cuenta la relación de masa y volumen medidas en una balanza<br><br>El espécimen se sumerge en un baño de agua a 25°C se mide y se anota su masa bajo el agua, se saca la probeta del agua se seca rápidamente con un trapo y se pesa al aire libre. El ensayo proporciona una guía para la determinación de masa del espécimen seco. | Universidad santo tomas-laboratorios<br>Universidad santo tomas-laboratorios<br><br>Universidad santo tomas-laboratorios |

Tabla 2. Continuación.

|                                                                                          |                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                                                                          | Contenido de<br>asfalto (Norma<br>INV E-732-13) | El ligante de la mezcla<br>asfáltica se quema utilizando<br>un horno, el contenido del<br>ligante asfáltico se calcula<br>como la diferencia entre la<br>masa inicial de la mezcla<br>asfáltica y la masa residual<br>del agregado con ajustes con<br>un factor de calibración. | Universidad santo<br>tomas-laboratorios |
|                                                                                          | Estabilidad<br>(Norma INV<br>E748-13)           | Una muestra de ligante<br>modificado, contenido con<br>un recipiente apropiado se<br>somete a la acción de<br>temperatura elevado duran<br>5 días determinando al final<br>de este tiempo el punto de<br>ablandamiento y la<br>penetración                                      | Universidad santo<br>tomas-laboratorios |
| establecer las<br>ventajas de la<br>implementación del<br>VTM en una mezcla<br>asfáltica | Comparación                                     | Comparación de resultados<br>de caracterización entre<br>mezcla asfáltica<br>convencional con la mezcla<br>asfáltica modificada con<br>vidrio templado.                                                                                                                         | Universidad santo<br>tomas              |

### Recolección de material

Los agregados recolectados fueron de tres tipos: triturados de arena sin lavar,  $\frac{3}{4}$  y  $\frac{1}{2}$  dichos materiales se consiguieron en la cantera de río Guayuriba que está ubicada por corredor Ecológico, Km. 5,3 Vereda, El Cocuy, Villavicencio, Meta.

*Figura 1. Recolección de material pétreo*



Nota: Fotografía tomada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

El vidrio templado se obtuvo de residuos, en total se consiguieron dos panorámicos de automóvil, después de su recolecta se procedió a triturar de manera artesanal para más adelante darle uso.

Respecto al asfalto se consiguió en la empresa PASOLIN SAS. Mezclas y Emulsiones Asfálticas de Calidad la cual queda ubicada por corredor Ecológico, Km. 5,3 Vereda, El Cocuy, Villavicencio, Meta.

*Figura 2. Planta de asfalto PASOLIN*



Nota: Fotografía tomada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

### Granulometría de vidrio templado

Para este ensayo primeramente se trituró de manera artesanal los dos panorámicos de vidrio templado, se utilizaron los tamices número 10, 40, 60, 100, 200 y fondo. La cantidad que se tamizó fueron 500 gr los cuales fueron tamizados de manera mecánica por 5 minutos.

*Figura 3. Trituración manual de VTM*



Nota: Fotografía tomada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

*Figura 4. Granulometría de VTM*



Nota: Fotografía tomada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

### **Resistencia a la degradación de los agregados por medio de la máquina de los ángeles INV E-218-13**

En este ensayo se midió la degradación de un agregado pétreo con una composición granulométrica tipo MDC-19, con base a este agregado se obtuvo una granulometría tipo C, es decir que se colocan 8 esferas a la máquina de los ángeles con 2500 gr de material granular retenido en el tamiz de 4.75mm (No. 4) y 2500 gr en el tamiz de 2.36mm (No. 8) con un total de material de 5000 gr. Luego se hizo girar el tambor con una velocidad entre 188 y 208 rad/minuto hasta completar 500 revoluciones.

*Figura 5. Desgaste Máquina de los Ángeles*



Nota: Fotografía tomada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

Se agrego a la máquina de los ángeles 5000 gr de material retenido en el tamiz No 12 seguido del proceso que se realizó en la máquina de los ángeles se pesó nuevamente obteniendo 4209.5 gr. para determinar el porcentaje de perdidas se tuvo en cuenta la masa de la muestra seca antes del ensayo y la masa de la muestra después del ensayo, previa lavado sobre tamiz No 12 teniendo como resultado 15.81% cumpliendo con las especificaciones técnicas según (INVIAS, 2020)

### **Granulometría de agregados INV E-213-13**

Para el ensayo de granulometría de agregados se lavó previamente los materiales posteriormente a esto se pusieron a secar durante 24 horas, los tamices que se utilizaron fueron los siguientes: con apertura 25 mm, 19 mm, 1/2", 9.5 mm, 4.75 mm, 2.36 mm y fondo. La cantidad que se tamizó fueron 2.5 kg los cuales fueron tamizados de manera mecánica por 5 minutos.

Figura 6. Granulometría de agregados



Nota: Fotografía tomada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

### **Densidad de materiales bituminosos sólidos y semisólidos (método del picnómetro)** **INV E-707-13**

Para este ensayo los equipos que se utilizaron fueron: picnómetro, termómetros, vaso de precipitados, balanza.

El procedimiento que se llevó a cabo fue el siguiente:

Se preparó la muestra calentándose a 130 °C en el horno y agitándose continuamente hasta llegar a la fluidez suficiente para ser vertida.

Se registró la masa del picnómetro, la masa del picnómetro lleno de agua destilada. a continuación, se vertió la cantidad de muestra suficiente dentro del picnómetro, limpio y seco, el cual fue llenado  $\frac{3}{4}$  de su capacidad, se dejó enfriar el picnómetro con el contenido de asfalto hasta la temperatura ambiente durante 40 minutos, se tomó el peso del picnómetro parcialmente lleno con asfalto. Por último, se terminó de llenar el picnómetro que contenía asfalto con agua destilada y se tomó su peso.

Figura 7. Densidad material bituminoso



Nota: Fotografía tomada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

### Penetración de los materiales bituminosos INV E-706-13

Los equipos utilizados para este ensayo fueron penetrómetro, aguja, recipiente para la muestra, baño de agua.

El procedimiento que se realizó fue el siguiente.

Se preparó la muestra calentándose a 130 °C en el horno y agitándose continuamente hasta llegar a la fluidez suficiente para ser vertida.

Se vertió la muestra dentro de 3 recipientes a  $\frac{3}{4}$  de su capacidad, a continuación, se permitió que se enfriara durante 45 minutos, después de estar a temperatura ambiente se colocaron las muestras en baño de agua a una temperatura de 25°C durante 45 minutos.

Posteriormente a esto se sacaban las muestras del baño de agua e inmediatamente se ponían en el aparato penetrómetro en donde se comprobaba que el vástago soporte de la aguja se encontraba limpio y seco, se ubicaba la aguja hasta que su punta tocara la superficie de la muestra sin que llegar a que esta penetrara, por último, se soltaba el mecanismo que libera la aguja y se leía y anotaba la distancia expresada en décimas de milímetros que haya penetrado la aguja en la muestra. Este procedimiento se realizó en los tres recipientes y se realizaron 3 penetraciones por cada muestra.

Figura 8. Penetración y Baño maría a 25°C



Nota: Fotografía tomada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

### **Punto de inflamación y de combustión mediante la copa abierta Cleveland INV E709-13**

Los equipos que se utilizaron en este ensayo fueron los siguiente: aparato de copa abierta de Cleveland, termómetro.

El procedimiento que se realizó fue el siguiente.

Se preparó la muestra calentándose a 130 °C en el horno y agitándose continuamente hasta llegar a la fluidez suficiente para ser vertida. En conjunto se prepara el aparato de copa abierta de Cleveland sobre una mesa firme en un cuarto libre de corriente de aire y mediante un soporte adecuado de puso el termómetro en una posición vertical

Se llenó la copa hasta la marca de llenado de esta. Se dejó enfriar a temperatura ambiente durante 30 minutos, posteriormente a estos se llevó la copa al aparato en donde se enciende la llama y se le aplicaba calor. cuando la muestra se encontraba a una temperatura de unos 28 °C por debajo del punto de inflamación supuesto se comenzó a hacer un barrido con la llama de ensayo con un movimiento suave y constante de forma horizontal, se registró el punto de inflamación, la lectura que el termómetro en el instante en que la llama produjo un destello sobre la superficie del asfalto, también se determinó el punto de combustión el cual se sabía cuándo el asfalto de encendía y mantenía la llama durante 5 segundo.

*Figura 9. Punto de inflamación*

Nota: Fotografía tomada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

### **Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional INV E-717.13**

Para este ensayo los equipos que se utilizaron fueron: horno, termómetro, balanza, vástagos cilíndricos, viscosímetro rotacional.

El procedimiento que se llevó a cabo fue el siguiente, se preparó la muestra calentándose a 130 °C en el horno y agitándose continuamente hasta llegar a la fluidez suficiente para ser vertida. A continuación, se vertió en 3 vástagos cilíndricos una cantidad de 13 gr de asfalto en cada uno y se dejó reposar a temperatura ambiente durante 20 minutos. Se encendió el viscosímetro rotacional y la unidad de control de temperatura donde se procede a precalentar el vástago con la muestra, este vástago se colocó en la parte inferior del viscosímetro, se ajustó la velocidad de rotación y el lector digital para que este indicara la viscosidad, durante el periodo de equilibrio de la muestra de asfalto se puso a rotar el vástago y se observaba la viscosidad hasta que la lectura en pantalla se estabilizara, de esta manera se registró el valor de viscosidad de las 3 muestras.

Figura 10. Viscosidad del asfalto



Nota: Fotografía tomada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

### **Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola) INV E-712-13**

Los equipos que se utilizaron en este ensayo fueron: anillos, placa base, bolas, baño, soporte de anillos, termómetros.

El procedimiento que se realizó fue el siguiente, se preparó la muestra calentándose a 130 °C en el horno y agitándose continuamente hasta llegar a la fluidez suficiente para ser vertida.

Se colocaron los anillos de latón sobre la placa base que había sido tratada con un producto antiadherente (vaselina), se vertió en estos el asfalto de manera que quedara a ras de su borde, se dejaron enfriar a temperatura ambiente durante 40 minutos. Posteriormente se colocaron estos anillos a enfriar en agua destilada a una temperatura de 12 °C durante 30 minutos.

Dentro de un vaso de precipitado con agua destilada a temperatura de 12 °C se hizo el montaje de los aparatos en una campana de laboratorio, colocando los anillos con asfalto, el termómetro y centrando las bolas en sus guías correspondientes sobre cada uno de los anillos del material que se ensayó. Por último, se puso el montaje en la máquina MATEST donde se anotaba para cada anillo y bola la temperatura indicada por el termómetro en el momento en que el asfalto que rodeaba la bola tocara el fondo de la placa de referencia.

Figura 11. Punto ablandamiento (Anillo y bola)



Nota: Fotografía tomada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

### Ensayo Marshall (contenido óptimo de asfalto) INV E-748-13

Para este ensayo los porcentajes de asfalto utilizados para la elaboración de las briquetas fueron de 4.5%, 5%, 5.5% y 6% de la mezcla total. Respecto a estos porcentajes se determinó la cantidad de agregado teniendo en cuenta que cada briqueta debía tener un total de 1200 g entre asfalto y agregados. A continuación, se muestra la distribución de material granular que se obtuvo.

El ensayo Marshall se realizó para un total de 12 muestras las cuales variaba su contenido de asfalto entre 4.5% y 6 % para así poder obtener el contenido óptimo de asfalto y se pudiera proceder a la elaboración de las briquetas modificadas con VTm.

Tabla 3. Distribución de material granular para cada porcentaje de asfalto

| TAMIZ  | % RETENIDO | 4.50%   | 5%      | 5.50%   | 6%      |
|--------|------------|---------|---------|---------|---------|
| 1/2    | 12.50      | 143.25  | 142.50  | 141.75  | 141.00  |
| 3/8    | 9.50       | 108.87  | 108.30  | 107.73  | 107.16  |
| Nº 4   | 23.00      | 263.58  | 262.20  | 260.82  | 259.44  |
| Nº 10  | 21.00      | 240.66  | 239.40  | 238.14  | 236.88  |
| Nº 40  | 18.50      | 212.01  | 210.90  | 209.79  | 208.68  |
| Nº 80  | 8.00       | 91.68   | 91.20   | 90.72   | 90.24   |
| Nº 200 | 7.50       | 85.95   | 85.50   | 85.05   | 84.60   |
| TOTAL  | 100.00     | 1146.00 | 1140.00 | 1134.00 | 1128.00 |

Nota: distribución de agregados pétreos de acuerdo al porcentaje retenido en cada tamiz. Por Laura Segura & Edwin Vanegas, 2021.

Para la preparación de briquetas se preparó el asfalto calentándose a 130 °C en el horno y agitándose continuamente hasta llegar a la fluidez suficiente para ser vertida. A continuación, se mezcló la porción de agregados con el porcentaje de asfalto respectivo, cuanto estaba totalmente homogéneo se llevó a el molde y se compacto aplicando 75 golpes por ambas caras del cilindro.

*Figura 12. Método Marshall*



Nota: Fotografía tomada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

Después de la compactación de los cilindros se pesaron los 12 especímenes de 3 maneras diferentes: la primera se secó en el aire, se pesó después de que haya permanecido por lo menos 1 hora a temperatura ambiente, la segunda manera fue el espécimen en agua donde se sumerge a 25°C durante 4 minutos y luego se determina la masa en el agua y por ultimo el espécimen saturado donde se secó rápidamente la superficie para pesarlo en una balanza digital.

*Figura 13. Peso de los especímenes sumergidos en el agua*



Nota: Fotografía tomada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

Con los pesos obtenidos anteriormente se determino la Densidad especifica Bulk y el porcentaje de vacíos en las briquetas, para la falla de los cilindros se dejaron en baño maría durante un tiempo de 30 -40 minutos a una temperatura de 60°C luego se llevaron a la maquina prensa de carga (master loader 5030) para fallarlos con la finalidad de obtener los datos de estabilidad y flujo de cada espécimen.

## Resultados

### Caracterización física de agregados pétreos y asfalto

Teniendo en cuenta las normas invias descritas anteriormente se realizaron diferentes ensayos que evaluaban las características físicas de los agregados y del asfalto obteniendo como resultado que cumplen con los parámetros estimados en la misma.

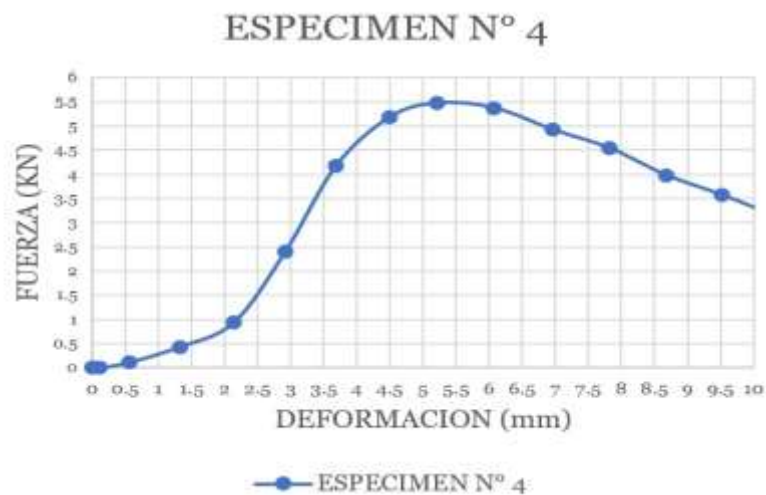
Tabla 4. Caracterización del asfalto

| ASFALTO                       |                |
|-------------------------------|----------------|
| Penetración                   | 45.4           |
| IP                            | -1             |
| punto de llama                | 220 °C         |
| punto de combustión           | 245 °C         |
| punto de llama y combustión   | 270 °C         |
| <u>punto de ablandamiento</u> | <u>51.5 °C</u> |

### Determinación de contenido óptimo de asfalto

Para determinar el contenido óptimo de asalto se tuvo en cuenta los datos obtenidos de la Master Loader 5030 donde se analizó el punto de falla y la fluidez de cada espécimen, Además se tuvo presente el peso específico promedio y el porcentaje de vacíos. La siguiente grafica muestra los resultados del espécimen que se comportó de la mejor manera al momento de fallarlo con una estabilidad de 5.09 KN y fluidez de 5.3 mm con un contenido de asfalto de 5%.

Figura 14. Diagrama Fuerza vs Deformación, mezcla asfáltica convencional



Nota: Realizada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

Tabla 5. Datos contenido óptimo de asfalto 4.5 y 5%

| ESPECIMEN                 | Nº 1   | Nº 2           | Nº 3   | Nº 4   | Nº 5           | Nº 6   |
|---------------------------|--------|----------------|--------|--------|----------------|--------|
| Contenido de asfalto      |        | 4.50 %         |        |        | 5.00 %         |        |
| Altura Prom               | 6.65   | 6.67           | 6.82   | 6.77   | 6.74           | 6.91   |
| Diametro Prom             | 9.87   | 9.83           | 9.89   | 9.81   | 9.94           | 9.85   |
| Volumen                   | 508.28 | 505.31         | 523.80 | 511.70 | 522.69         | 526.36 |
| PE Prom                   |        | <b>2182.91</b> |        |        | <b>2145.67</b> |        |
| FLUIDEZ (0.25mm)          | 4.31   | 5.40           | 7.05   | 5.22   | 5.40           | 8.67   |
| FLUIDEZ Prom              |        | <b>5.59</b>    |        |        | <b>6.43</b>    |        |
| ESTABILIDAD Exp.          | 6.29   | 5.91           | 3.88   | 5.47   | 5.09           | 4.39   |
| Fac. corrección de altura | 1.04   | 1.04           | 0.96   | 1.00   | 1.00           | 0.96   |
| ESTABILIDAD               | 6.54   | 6.15           | 3.72   | 5.47   | 5.09           | 4.21   |
| ESTABILIDAD MEDIA         |        | <b>5.47</b>    |        |        | <b>4.92</b>    |        |
| % vacíos                  | 4.13   | 4.75           | 5.35   | 3.91   | 4.59           | 5.13   |
| % Vacíos Prom             |        | <b>4.74</b>    |        |        | <b>4.54</b>    |        |

NOTA: Resumen de los datos del Ensayo de Gravedad específica Bulk y Contenido Optimo de asfalto convencional.

Tabla 6. Datos contenido óptimo de asfalto 5.5 y 6 %

| ESPECIMEN                 | Nº 7   | Nº 8           | Nº 9   | Nº 10  | Nº 11          | Nº 12  |
|---------------------------|--------|----------------|--------|--------|----------------|--------|
| Contenido de asfalto      |        | 5.50 %         |        |        | 6.00 %         |        |
| Altura Prom               | 6.77   | 6.74           | 6.91   | 7.03   | 6.97           | 7.12   |
| Diametro Prom             | 9.81   | 9.94           | 9.85   | 9.88   | 9.88           | 9.86   |
| Volumen                   | 511.70 | 522.69         | 526.36 | 539.15 | 534.17         | 543.66 |
| PE Prom                   |        | <b>2190.69</b> |        |        | <b>2090.47</b> |        |
| FLUIDEZ (0.25mm)          | 7.23   | 6.50           | 9.06   | 13.36  | 6.24           | 6.34   |
| FLUIDEZ Prom              |        | <b>7.60</b>    |        |        | <b>8.65</b>    |        |
| ESTABILIDAD Exp.          | 7.30   | 4.38           | 4.16   | 1.79   | 3.17           | 2.83   |
| Fac. corrección de altura | 1.00   | 1.00           | 0.96   | 0.93   | 0.96           | 0.93   |
| ESTABILIDAD               | 7.30   | 4.38           | 3.99   | 1.66   | 3.04           | 2.63   |
| ESTABILIDAD MEDIA         |        | <b>5.22</b>    |        |        | <b>2.45</b>    |        |
| % vacíos                  | 2.35   | 3.83           | 4.94   | 5.19   | 4.87           | 7.17   |
| % Vacíos Prom             |        | <b>3.70</b>    |        |        | <b>5.74</b>    |        |

NOTA: Resumen de los datos del Ensayo de Gravedad específica Bulk y Contenido Optimo de asfalto convencional.

Se determino el contenido de asfalto teniendo en cuenta los datos del peso específico máximo, estabilidad máxima, fluidez mínima y porcentaje de vacíos medio dándonos como resultado un contenido óptimo de 5% de asfalto.

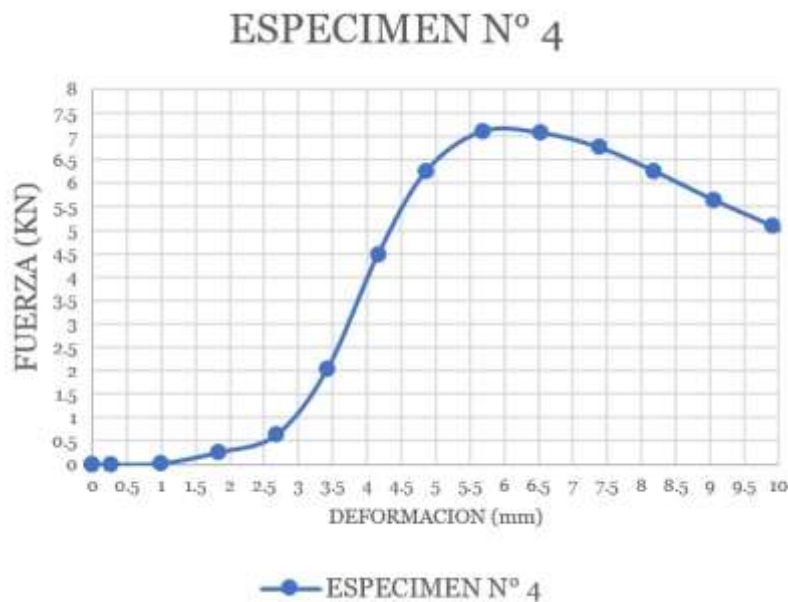
Tabla 7. Determinación de contenido optimo asfalto

| Propiedad            | Contenido de asfalto (%) |
|----------------------|--------------------------|
| Peso específico      | 5.5                      |
| Estabilidad          | 4.5                      |
| Porcentaje de vacíos | 4.5                      |
| Fluidez              | 4.5                      |
| Contenido óptimo     | 5                        |

### Ensayo Marshall con mezcla Asfáltica modificada con VTM

La siguiente grafica muestra los resultados del espécimen N°4 con una estabilidad de 7.1 KN y fluidez de 5.6 mm con un contenido de asfalto de 5% y 20% de VTM reemplazado en el material retenido en el tamiz N°10.

Figura 15. Diagrama Fuerza vs Deformación



Nota: Realizada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

Los resultados obtenidos del ensayo de estabilidad y flujo en los cilindros de mezcla modificada fueron los siguientes:

Tabla 8. porcentaje de VTM y gravedad especifica bulk

| ESPECIMEN                                      | Nº 1     | Nº 2         | Nº 3     | Nº 4     | Nº 5         | Nº 6     |
|------------------------------------------------|----------|--------------|----------|----------|--------------|----------|
| Contenido de VTM reemplazado por Agregado N°10 |          |              |          |          |              |          |
| Contenido de asfalto                           |          | 10.00 %      |          |          | 20.00 %      |          |
| Altura Prom                                    |          | 5.00 %       |          |          | 5.00 %       |          |
| Diametro Prom                                  |          | 6.03         |          | 6.60     | 6.87         | 6.70     |
| Volumen                                        |          | 6.03         |          | 9.84     | 9.87         | 9.81     |
| GRAVEDAD ESPECIFICA                            | 6.77     | 9.68         | 6.49     | 501.91   | 525.35       | 506.41   |
| PESO ESPECIFICO                                | 9.97     | 443.07       | 9.87     | 2.196    | 2.216        | 2.173    |
| PE Prom                                        | 528.00   | 2.230        | 496.05   | 2195.612 | 2215.613     | 2173.285 |
| FLUIDEZ Prom                                   | 2.101    | 2229.675     | 2.226    |          | 2194.837     |          |
| ESTABILIDAD Exp.                               | 2100.885 | 2185.435     | 2225.746 |          |              |          |
| Fac. correcion de altura                       |          | <b>6.046</b> |          |          | <b>6.253</b> |          |
| ESTABILIDAD                                    | 2.71     | 4.35         | 7.66     | 5.12     | 7.1          | 6.61     |
| ESTABILIDAD MEDIA                              | 0.96     | 1.32         | 1.04     | 1.04     | 0.96         | 1.04     |
| % vacios                                       | 2.6016   | 5.742        | 7.9664   | 5.3248   | 6.816        | 6.8744   |
| % Vacios Prom                                  | 2.462    | <b>5.437</b> | 2.218    |          | <b>6.338</b> |          |
|                                                |          | 2.708        |          |          |              |          |
|                                                |          | <b>2.463</b> |          |          |              |          |
|                                                |          |              |          | 3.188    | 2.475        | 3.357    |
|                                                |          |              |          |          | <b>3.006</b> |          |

NOTA: Resumen de los datos del Ensayo de Gravedad especifica Bulk y Contenido Optimo de asfalto modificado con VTM

Tabla 9. porcentaje de VTM y gravedad especifica bulk.

| ESPECIMEN                                      | Nº 7     | Nº 8         | Nº 9     |
|------------------------------------------------|----------|--------------|----------|
| Contenido de VTM reemplazado por Agregado N°10 |          | 30.00 %      |          |
| Contenido de asfalto                           |          | 5.00 %       |          |
| Altura Prom                                    | 7.21     | 6.82         | 6.64     |
| Diametro Prom                                  | 9.82     | 9.90         | 9.90     |
| Volumen                                        | 545.51   | 524.20       | 510.87   |
| GRAVEDAD ESPECIFICA                            | 2.131    | 2.245        | 2.175    |
| PESO ESPECIFICO                                | 2131.295 | 2245.455     | 2174.863 |
| PE Prom                                        |          | 2183.871     |          |
| FLUIDEZ Prom                                   |          | <b>6.416</b> |          |
| ESTABILIDAD Exp.                               | 1.74     | 5.11         | 3.66     |
| Fac. correcion de altura                       | 0.93     | 0.96         | 1        |
| ESTABILIDAD                                    | 1.6182   | 4.9056       | 3.66     |
| ESTABILIDAD MEDIA                              |          | <b>3.395</b> |          |
| % vacios                                       | 3.850    | 3.052        | 3.915    |
| % Vacios Prom                                  |          | <b>3.606</b> |          |

NOTA: Resumen de los datos del Ensayo de Gravedad especifica Bulk y Contenido Optimo de asfalto modificado con VTM

Para determinar el porcentaje optimo que se debe reemplazar en el material retenido en el tamiz de 2 mm (N°10) se tuvieron en cuenta los porcentajes 10, 20 y 30% y según los datos obtenidos de estabilidad y fluidez de los especímenes se escoge el 20% donde se puede evidenciar que los especímenes se comportan mejor al momento de fallarlos.

## Diseño Shell mezcla asfáltica convencional

Para el diseño Shell se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros los cuales determinaron el código de la mezcla para si proponer un diseño final tanto en la mezcla convencional y la modificada con VTM.

Tabla 10. Datos obtenidos Metodología Shell

| DATOS                  |                      |                  |
|------------------------|----------------------|------------------|
| T                      | 26.09                | °C               |
| Precipitación          | 4146.933             | mm               |
| Fp                     | 2.12                 |                  |
| W-MAAT                 | 26                   | °C               |
| T800                   | 50                   | °C               |
| $\Delta T$             | 14                   | °C               |
| Rigidez del<br>asfalto | $2 \times 10^6$      | N/m <sup>2</sup> |
| Smix                   | $2 \times 10^9$      | N/m <sup>2</sup> |
| et                     | $1.3 \times 10^{-4}$ |                  |

Mediante el uso de las cartas de metodología Shell y los datos anteriores se determinó el código final de la mezcla.

Tabla 11. Código de mezcla convencional

| CÓDIGO FINAL DE LA MEZCLA |    |    |
|---------------------------|----|----|
| S1                        | F2 | 50 |

A partir de los datos de Modulo de resiliencia, código de la mezcla y temperatura se obtuvo la carta HN a usar, dándonos como resultado la carta HN 50

Tabla 12. Datos para Diseño metodología Shell

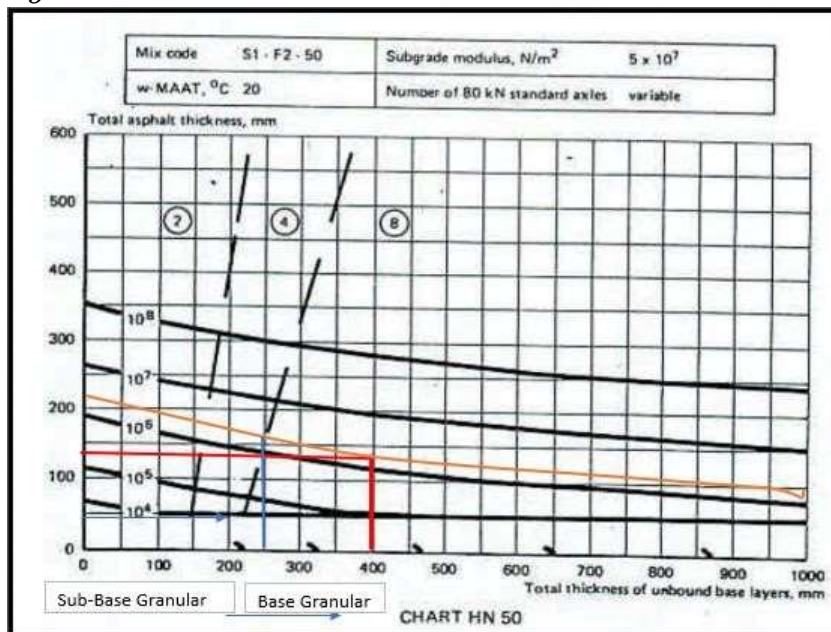
| DATOS                            |          |
|----------------------------------|----------|
| Carta de diseño                  | HN-50    |
| N8,2                             | 5.00E+06 |
| Mr subrasante(N/m <sup>2</sup> ) | 5.00E+07 |
| TMAP(°c)                         | 26.08721 |

Con la carta HN 50 se determinó los espesores de la carpeta asfáltica, base granular y subbase granular dándonos como resultado un espesor de carpeta de 13 cm y un espesor en granulares de 40 cm

Tabla 13. Distribución de espesor de pavimento

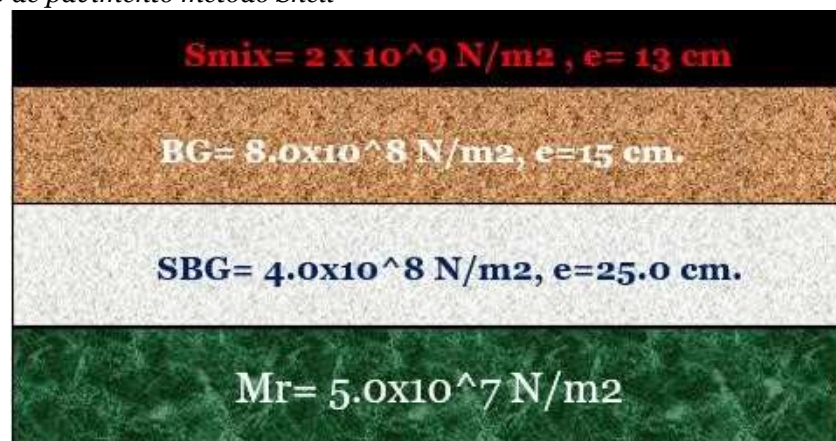
| <b>Distribución</b>               |       |
|-----------------------------------|-------|
| Espesor de Carpeta                | 13 cm |
| Espesor de granulares             | 40 cm |
| <b>División de los granulares</b> |       |
| Base granular                     | 15 cm |
| Sub-base Granular                 | 25 cm |

Figura 16 Carta HN 50



Nota: Realizada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

Figura 17. Diseño de pavimento método Shell



Nota: Realizada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

## Diseño Shell mezcla modificada con VTM

Tabla 14. Datos obtenidos metodología Shell (VTM)

| DATOS                  |                      |                  |
|------------------------|----------------------|------------------|
| T                      | 26.09                | °C               |
| Precipitación          | 4146.933             | mm               |
| Fp                     | 2.12                 |                  |
| W-MAAT                 | 26                   | °C               |
| T800                   | 50                   | °C               |
| $\Delta T$             | 14                   | °C               |
| Rigidez del<br>asfalto | $2 \times 10^6$      | N/m <sup>2</sup> |
| Smix                   | $2.5 \times 10^9$    | N/m <sup>2</sup> |
| et                     | $1.1 \times 10^{-4}$ |                  |

Mediante el uso de las cartas de metodología Shell y los datos anteriores se determinó el código final de la mezcla.

Tabla 15. Código de mezcla modificada con VTM

| CÓDIGO FINAL DE LA MEZCLA |    |    |
|---------------------------|----|----|
| S1                        | F2 | 50 |

A partir de los datos de Modulo de resiliencia, código de la mezcla y temperatura se obtuvo la carta HN a usar, dándonos como resultado la carta HN 50

Tabla 16. Datos de diseño metodología Shell (VTM)

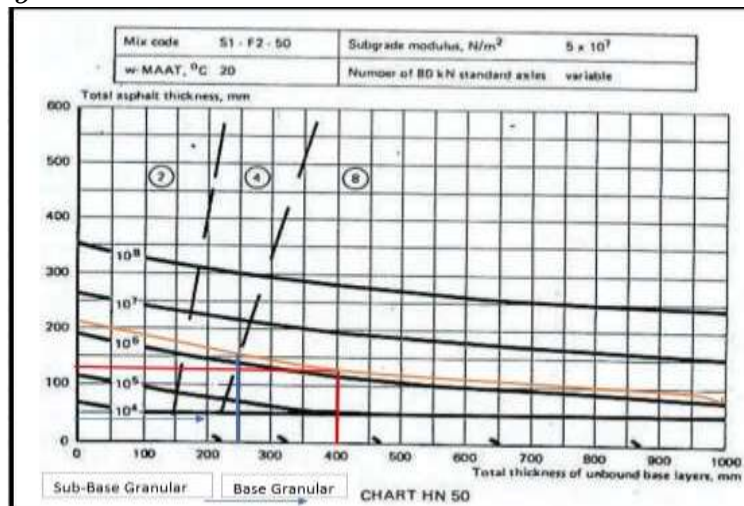
| DATOS                            |          |
|----------------------------------|----------|
| Carta de diseño                  | HN-50    |
| N <sub>8,2</sub>                 | 5.00E+06 |
| Mr subrasante(N/m <sup>2</sup> ) | 5.00E+07 |
| TMAP(°C)                         | 26.08721 |

Con la carta HN 50 se determinó los espesores de la carpeta asfáltica, base granular y subbase granular dándonos como resultado un espesor de carpeta de 13 cm y un espesor en granulares de 40 cm.

Tabla 17 Distribución de espesores de pavimento con VTM

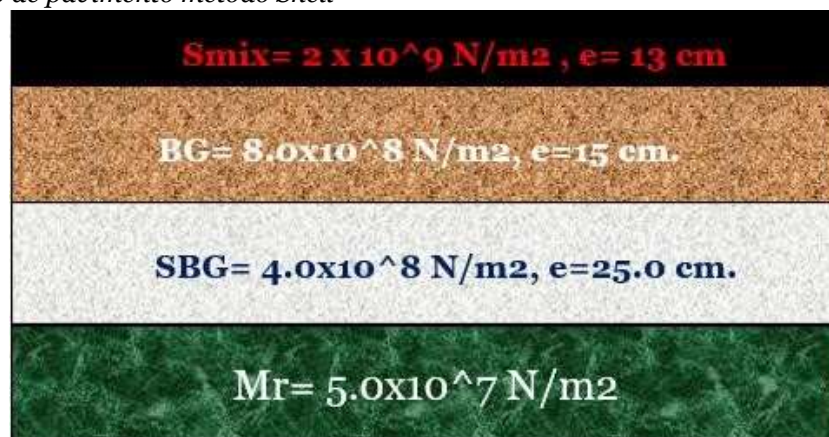
| <b>Distribución</b>               |       |
|-----------------------------------|-------|
| Espesor de Carpeta                | 13 cm |
| Espesor de granulares             | 40 cm |
| <b>División de los granulares</b> |       |
| Base granular                     | 15 cm |
| Sub-base Granular                 | 25 cm |

Figura 18. Carta HN 50



Nota: Realizada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

Figura 19. Diseño de pavimento método Shell



Nota: Realizada por Edwin Vanegas & Laura Segura 2021

A continuación, se presenta la comparación de una mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica modificada con VTM teniendo en cuenta sus ventajas y desventajas según los ensayos realizados en la investigación.

*Tabla 18. Comparación de mezclas asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada con VTM*

| Mezcla asfáltica convencional                                   |                                                                                                | Mezcla asfáltica modificada con VTM                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ventajas                                                        | Desventajas                                                                                    | Ventajas                                                                                                                                                                                                                      | Desventajas                                                                                                               |
| -Su funcionalidad es buena resistiendo a ahuellamiento y fatiga | -Requiere mayor cantidad de agregados pétreos.<br>-Costo más elevado -Su estabilidad es menor. | -Aporta la misma funcionalidad que una mezcla convencional.<br>-Mitiga la explotación de agregados pétreos en canteras. -Presenta mayor estabilidad. - Disminuye la cantidad de residuos causados por el VTM.<br>-Menor costo | -Requiere de mayor cuidado en el proceso constructivo.<br>-Presenta perdidas de material VTM a la hora de su trituración. |

## Conclusiones

Al comparar el comportamiento de estabilidad de una mezcla convencional y una modificada con VTM se obtuvieron valores de 4.925 y 6.338 respectivamente lo cual nos indicó que al agregar el material no reciclable a la mezcla su capacidad de resistir desplazamiento y deformaciones bajo las cargas de tránsito aumentan notablemente, por consiguiente, una mezcla modificada con VTM no será tan susceptible a fatiga y ahuellamientos.

Se seleccionó la mezcla modificada con 20 % de VTM ya que presento mayor estabilidad lo cual nos garantiza una resistencia mayor bajo cargas de tránsito.

Se observó que en el diseño mediante la metodología Shell de una mezcla convencional y una mezcla modificada con VTM en un 20% no presenta variación, sus capas cumplirán las mismas funciones, sin embargo, al adicionar VTM se cumplirá con la reducción de contaminación que produce dicho material, además se podría llegar a minimizar la explotación de canteras al ser reemplazado parte de material pétreo por residuos.

Se pudo concluir que una mezcla asfáltica modificada se requiere mayor cuidado en el proceso constructivo ya que la trituración del vidrio puede llegar a causar lesiones, también es importante tener en cuenta que durante este proceso se evidencia perdidas de dicho material.

Al reutilizar el vidrio templado se evidencia que se requiere menor cantidad de material pétreo y puede reflejar una disminución de costos de explotación y transporte de dicho material.

## **Recomendaciones**

Manipular con precaución las briquetas de mezcla asfáltica antes de ser falladas, según INVIAS estas deben estar a 60° C de 30 a 40 minutos y se vuelven muy susceptibles a la hora de extraerlos del baño maría.

En próximas investigaciones afines se evalúen mezclas utilizando nuevos modificadores, teniendo en cuenta que sean materiales no biodegradables, que ayuden a contribuir con un impacto positivo para el medio ambiente.

Complementar las investigaciones con tramos de prueba, que permitan verificar a escala real, el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas.

## Referencias bibliográficas

- Alvarado, M., & Ayala, A. (2018). Seminario De Profundización Reciclaje Pavimentos Flexible: Estudio De Mezclas Asfálticas Recicladas Modificadas Con Diferentes Porcentajes De Weo (Wa). *Actualidades en Psicología*, 32(125), 95-112.  
<https://doi.org/10.15517/ap.v32i125.32123>
- Aranguren, E. (2015). *Caracterización De Una Mezcla Asfáltica Empleando Alquitrán, Escoria Granulada Y Agregado De Caliza*. [Trabajo de grado, Universidad militar Nueva Granada]. Repositorio.  
<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13369/Tesis%20UMNG%202014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Borja, T., & Cárdenas, C. (2019). *Caracterización de mezclas asfálticas en caliente, elaborados con el uso de cemento asfáltico modificado con polímero SBR y SBS*. 258. [Trabajo de grado, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio  
<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/18757/1/T-UCE-0011-ICF-141.pdf>
- Cabezas, P. (2020). *Caracterización física de un ligante asfáltico 60/70 modificado con desechos de polietileno de alta densidad (D-PEAD)*. [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomas]. Repositorio  
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/21778/2020paulacabezas?sequence=1&isAllowed=y>
- Díaz, C., & Castro, L. (2017). *Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá*. [Monografía de grado, Universidad Santo Tomas]. Repositorio  
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2633/Diazcesar2017.pdf>
- Florez, J., Gómez, S., & Cely, N. (2018). *Caracterización física y reológica del asfalto modificado con aceite de coco*. [Trabajo de grado, Universidad Catolica de Colombia]. Repositorio.  
<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22422/1/TESIS%20PROYECTO%20ACEITE%20COCO%20ESP%20PAVIMENTOS2.pdf>
- Forero, M. A., & Hernández, J. A. (2020). *Diseño Marshall y verificación de adherencia de una mezcla asfáltica MDC-25 con reemplazo parcial de material granular por ceniza de cascarilla de arroz*. [Trabajo de grado, Universidad catolica de Colombia]. Repositorio.  
<https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/24768>
- Freire, N. (2018). Uso de vidrio molido en las mezclas asfálticas , con el propósito de reducir la contaminación. [Trabajo de grado, Pontificia Universidad Catolica del Ecuador].

- Repositorio. <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/15089/TESIS-%20MEZCLA%20ASFALTICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Glasstek. (2017). *Termoendurecido Templado Químico Vidrio Termoendurecido*. <https://www.glasstek.es/glasstek/>
- Infante, S. A. (2015). *Evaluación de características físicas y mecánicas de una base estabilizada con cemento modificada con vidrio templado reciclado*. [Trabajo de grado, Universidad de la Salle]. Repositorio. [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1029&context=ing\\_civil](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1029&context=ing_civil)
- INVIAS, I. N. (31 de Diciembre de 2020). INVIAS. Estado de la Red Vial. <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estadode-la-red-vial>
- INVIAS. (2013). *Capítulo 4 (sobre pavimentos asfálticos)*. 1-440. [ftp://ftp.ani.gov.co/Licitación VJVGCLP\\_001-2016-M-1/Especificaciones Generales de Construccion de carreteras/CAPÍTULO 4\\_1.pdf](ftp://ftp.ani.gov.co/Licitación/VJVGCLP_001-2016-M-1/Especificaciones_Generales_de_Construccion_de_carreteras/CAPÍTULO_4_1.pdf)
- Jaramillo, T. M. (2018). *Analysis of Construction Specifications of Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS) and Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá (IDU) according to the explicit quality requirements for materials in the pavement design methods used in Colombia*. [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/69509/1053772943.2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lizcano, O., & Ramos, D. A. (2020). *Estudio del comportamiento físico-mecánico de mezclas asfálticas modificadas con llenante mineral de ceniza de la cascarilla resultante de la molienda del arroz*. [Trabajo de grado, Universidad Catolica de Colombia]. Repositorio. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24575/1/1%20Documento.pdf>
- Martinez, G., Caicedo, B., González, D., Celis, L., Fuentes, L., & Torres, V. (2018). Thirteen Years of Continuous Development in Crumb Rubber Modified Asphalt Mixtures in Bogota: Achieving Pavement Sustainability . [Revista Ingenieria de Construccion, 33(1), 41-50]. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732018000100041>
- Ochoa, R., Grimaldo, G. E., Orjuela, M., & Muñoz, C. (2018). Analysis of use of granulated slag in asphalt mixtures manufacturing for pavements. *Espacios*, 39(37). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85053262366&partnerID=40&md5=22fe4f5d34677479117af7a0670b3cf1>
- Rondon, H. A. (2016). Pavimentos: materiales, construccion y diseno. Ecoe Ediciones. <https://elibro.net/es/lc/usta/titulos/70435>

- Sepúlveda, A. (9 de Septiembre de 2020). Manual del reciclaje: Lo que sí y lo que no se puede reciclar.. <https://www.meteored.cl/noticias/ciencia/manual-del-reciclaje-lo-que-si-y-loque-no-se-puede-reciclar-en-chile.html>
- Silvestre, A., & Gutierrez, A. (2018). *asfaltos modificados con vidrio y su comparación técnico y económico con los asfaltos convencionales. Línea de investigación institucional: Transporte y urb.* [Trabajo de grado, Universidad peruana los andes]. Repositorio. <https://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12848/936/GUTIERREZ%20SILVESTRE%2C%20ABEL%20ANDREI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Suarez, A. (2019). *Análisis monotonico de mezclas densas en caliente con asfalto modificado con 50% de caucho y 50% de cuero.* [Trabajo de grado, Universidad Catolica de colombia]. Repositorio. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23893/1/TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- Umbarila, C. A., & Hernández, C. A. (2017). *Estado del arte de mezclas asfálticas modificadas en los últimos 10 años: caso de estudio universidades de bogotá dc.* [Trabajo de grado, Universidad Piloto de Colombia]. Repositorio. <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00003837.pdf>
- Vanegas, J. D., Caro Spinel, S., Caicedo Hormaza, B., & Estrada Mejía, N. (2017). *Caracterización mecánica de una mezcla asfáltica modificada con fibras sintéticas.* Uniandes. [Trabajo de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio <https://ezproxy.uniandes.edu.co:8443/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat07441a&AN=cpu.729643&lang=es&site=eds-live&scope=site>
- Vaquiroy, R. A., & Padilla, E. F. (2020). *Evaluación del comportamiento en una mezcla asfáltica densa en caliente (MDC-19) con cemento de uso general como agente modificador.* [Trabajo de grado, Universidad Piloto de Colombia]. Repositorio. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/7458>
- Velez, N., & Restrepo, C. (2010). Reutilización de desechos de vidrio industrial no reciclable. [Trabajo de grado, Universidad EAFIT]. Repositorio. <https://core.ac.uk/download/pdf/47244974.pdf>
- Yepes, T., Ospina, G., Aguilar, J., Calderon, L., Concha, T., Junca, J., & Martínez, S. (2013). Indicadores del sector transporte en Colombia. *Fedesarrollo Centro de Investigación Económica y Social*, 26(4), 1-37. <https://bit.ly/31Lr8Jn>