



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON MATERIAL RECICLADO E
INCORPORANDO FIBRAS DE VIDRIO PARA ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO
VIAL EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingenieros Civiles

AUTORES: Freddy Santiago Lara Vasconez
Anderson Brayan Suquillo Hoyos

TUTORA: Rocío Nathaly Bermeo Hidalgo

Quito - Ecuador
2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Freddy Santiago Lara Vasconez con documento de identificación N° 1752672459 y Anderson Brayan Suquillo Hoyos con documento de identificación N° 1721264214; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.


Quito, 11 de julio del 2024

Atentamente,



Freddy Santiago Lara Vasconez

1752672459



Anderson Brayan Suquillo Hoyos

1721264214

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Freddy Santiago Lara Vasconez con documento de identificación N° 1752672459 y Anderson Brayan Suquillo Hoyos con documento de identificación N° 1721264214; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Estudio de una mezcla asfáltica en frío con material reciclado e incorporando fibras de vidrio para actividades de mantenimiento vial en el Distrito Metropolitano de Quito”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

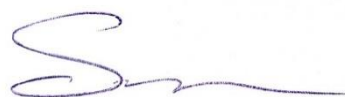
En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de julio del 2024

Atentamente,



Freddy Santiago Lara Vasconez
1752672459



Anderson Brayan Suquillo Hoyos
1721264214

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Rocío Nathaly Bermeo Hidalgo con documento de identificación N° 2101129977, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTUDIO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON MATERIAL RECICLADO E INCORPORANDO FIBRAS DE VIDRIO PARA ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO VIAL EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, realizado por Freddy Santiago Lara Vasconez con documento de identificación N° 1752672459 y Anderson Brayan Suquillo Hoyos con documento de identificación N° 1721264214, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de julio del 2024

Atentamente,



Ing. Rocío Nathaly Bermeo Hidalgo, MSc.

2101129977

ESTUDIO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON MATERIAL RECICLADO E INCORPORANDO FIBRAS DE VIDRIO PARA ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO VIAL EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

STUDY OF A COLD ASPHALT MIXTURE WITH RECYCLED MATERIAL AND INCORPORATING GLASS FIBERS FOR ROAD MAINTENANCE ACTIVITIES IN THE METROPOLITAN DISTRICT OF QUITO

Freddy Lara-Vasconez¹, Anderson Suquillo-Hoyos², Rocío Bermeo-Hidalgo³

Resumen

En la ciudad de Quito en las labores de mantenimiento vial se usan varias técnicas y tipos de mezclas, por lo general la mezcla caliente es empleada en vías de mayor tráfico, y en vías de menor tránsito la mezcla en frío es la más utilizada por su versatilidad y las ventajas que presenta al no ser calentadas, así surge la propuesta de una mezcla en frío modificada que tiene como objetivo utilizar material reciclado con fibras de vidrio, para evaluar sus propiedades físico-mecánicas y verificar que condiciones cumple y si pudiera ser utilizada para las actividades de bacheo rutinario o rehabilitación vial.

Para este estudio la mezcla asfáltica en frío es elaborada con asfalto diluido RC-250, material fresado, agregados naturales y fibras de vidrio en distintos porcentajes que aumentan progresivamente hasta el 1.25% , es importante en la mezcla la caracterización de sus agregados, por lo tanto se ensayara en los laboratorios de materiales a los agregados y al material reciclado, así mismo una vez conformada la mezcla se la experimentará en el laboratorio de pavimentos para identificar sus propiedades y su idoneidad.

Se determinó que la mezcla modificada obtenida proporciona favorables resultados, las fibras de vidrio mejoran la estabilidad y el flujo de las

Abstract

In the city of Quito, several techniques and types of mixtures are used in road maintenance tasks. Generally, the hot mixture is used on roads with greater traffic, and on roads with less traffic, the cold mixture is the most used due to its versatility and the advantages that it presents by not being heated, thus the proposal of a modified cold mixture arises that aims to use recycled material with glass fibers, to evaluate its physical-mechanical properties and verify what conditions it meets and if it could be used for routine patching or road rehabilitation activities.

For this study, the cold asphalt mixture is prepared with diluted RC-250 asphalt, milled material, natural aggregates and glass fibers in different percentages that increase progressively up to 1.25%. The characterization of its aggregates is important in the mixture; therefore, both the aggregates and the recycled material will be tested in the materials laboratories, and once the mixture is formed, it will be tested in the pavement laboratory to identify its properties and suitability.

It was determined that the modified mixture obtained gives favorable results, the glass fibers improve the stability and flow of the asphalt briquettes, they also provide cohesion and

¹ Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador.
Autor para correspondencia: flarav@est.ups.edu.ec

² Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador.
Autor para correspondencia: asuquilloh@est.ups.edu.ec

³ Docente de la carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador.
Autor para correspondencia: rbermeo@ups.edu.ec

briquetas asfálticas, además otorgan cohesión y resistencia al calor, y en una correcta dosificación mejora su trabajabilidad e incorpora mejor el ligante asfáltico, y todo esto acompañado de un ahorro en agregados y asfalto diluido.

resistance to heat, and in a correct dosage it improves its workability and better incorporates the asphalt binder, and all this accompanied by savings in aggregates and diluted asphalt.

Palabras Clave: Fibras de Vidrio, Fresado, Horno de Ignición, Método Marshall Modificado, Mezcla en Frío, RC-250.

Keywords: Fiberglass, Milling, Ignition Furnace, Modified Marshall Method, Cold Mix, RC-250.

1. Introducción

La conservación vial dentro del Distrito Metropolitano de Quito resulta importante porque la movilización de sus ciudadanos es sinónimo de desarrollo y crecimiento económico, este eje ha significado un reto para las autoridades, en una carrera entre el mantenimiento vial versus los daños viales que surgen día a día.

La construcción de nuevas capas de rodadura supone una fuerte inversión en la red vial, pero necesarias ante el crecimiento porcentual de la población, y el aumento de vehículos es proporcional a este crecimiento demográfico poblacional. La idea central del mantenimiento vial es avalar que el transporte sea confortable, rápido y seguro, sin encarecer sus procesos preservando así el capital ya invertido.

Cuando una vía no recibe mantenimiento, su durabilidad disminuye rápidamente. En términos concretos, aproximadamente al 40% de su vida útil, la vía ya muestra un deterioro del 75%. A partir de ese punto, el deterioro se acelera, aumentando en un 40% en un 12% de tiempo adicional. Esto significa que el 80% del deterioro se produce en el 87% del tiempo de vida de la carretera. Esta situación impacta significativamente en la economía al momento de realizar el mantenimiento vial, ya que implica costos considerables para restaurar la vía a un estado aceptable y cumplir con el 100% de su vida útil. [1]

Es por ello que nace la propuesta de una mezcla modificada en frío con material reciclado, que es compatible con el sistema vial de la ciudad, ya que se cuenta con fresado como resultado de la repavimentación de las vías más importantes, es el mismo el cual puede servir para un bacheo, una rehabilitación vial, un mejoramiento vial o un control de polvo, el RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado) resulta un material versátil y es ampliamente usado para mejorar la calidad de vida y movilización en la ciudad de Quito de forma rápida, económica y amigable con el medio ambiente.

El RAP, que es el material reciclado de un pavimento asfáltico usado, se puede reutilizar en nuevas estructuras viales o en renovaciones, lo que ayuda a reducir costos y a conservar los recursos naturales al disminuir la necesidad de nuevo material. [2]

La principal razón para usar el fresado en las mezclas asfálticas es promover la sostenibilidad al reutilizar material desechado, lo que reduce el impacto ambiental. Además, sustituir parte de la mezcla asfáltica implica ahorros en ligante y agregados, beneficiando el costo final del producto. [3]

Carillo e Ipiates [4] realizaron un estudio de Mezclas Asfálticas en Frío modificadas con fibras de vidrio donde expone que después de realizar ensayos Marshall, se determinó que el porcentaje óptimo de fibra de vidrio en la mezcla es del 0.15%. Se evaluaron la densidad Bulk, la estabilidad y el flujo de mezcla, comparándola con la mezcla asfáltica convencional. Se encontró que la mayor densidad Bulk y estabilidad se obtienen con el 0.15% de fibra de vidrio agregada, esto se logró después de probar diferentes porcentajes, desde 0.05% hasta 0.25%, es importante tener en cuenta los valores establecidos de agua y residuo asfáltico. Por lo tanto, estos resultados ofrecen un punto de partida para la dosificación de la fibra de vidrio a incorporar en la mezcla modificada, hay que considerar que estos valores de fibra de vidrio corresponden a una mezcla sin fresado.

Por otra parte, Quispe [5] en su propuesta de aplicación de fibras de vidrio en el diseño de mezcla asfáltica en caliente para rehabilitar pavimentos flexibles, se encontró que agregar un 3% de fibra de vidrio a la mezcla de asfalto en caliente mejora la estabilidad del pavimento de 1122 kg y tiene un flujo de 3.43 mm. En efecto se tendrá que experimentar que porcentaje de fibra de vidrio presenta similares resultados en una mezcla en frío modificada.

Adicionalmente, Según Méndez y Torres [6] en su investigación diseño de una mezcla asfáltica en frío reutilizando material asfáltico fresado e incorporando fillers comerciales. Se

pudo determinar a través del ensayo de granulometría que el RAP cumple con las especificaciones establecidas en la MOP-001-F 2002 para el diseño de mezclas asfálticas en frío, en donde se utiliza fresado en el lugar de agregados, los porcentajes de RAP que pasan por los tamices correspondientes se encuentran dentro de los límites establecidos por la faja tipo C, lo cual es recomendable para el diseño esto se puede ver en la tabla N° 2. Las conclusiones que se encuentran en este trabajo presentan idoneidad en el uso del fresado para una mezcla asfáltica.

Para obtener una mezcla de calidad hay que controlar los materiales que la conforman, deberán cumplir especificaciones técnicas, y se materializará con procesos experimentales en los laboratorios de pavimentos y ensayo de materiales. Para un diseño óptimo de una mezcla asfáltica en frío se usará la metodología modificada Marshall, que se llevará a cabo con la fabricación de briquetas in situ y con su respectivo ensayo de estabilidad y flujo.

En este escenario, el estudio académico actual busca identificar si hay alguna disparidad en el rendimiento entre las mezclas asfálticas en frío y aquellas modificadas con fibra de vidrio. Para lograrlo, se lleva a cabo un experimento donde se utilizan muestras de la mezcla en frío con distintos porcentajes de fibra de vidrio que van desde 0% a 1.25% en intervalos de 0.25%. Además, las briquetas se evalúan en el laboratorio para determinar posibles diferencias y caracterizar sus propiedades físicas y mecánicas.

2. Materiales y Métodos

Los materiales y métodos serán sumamente detallados en base al proceso y análisis respectivo de cada ensayo, que se sustentan en la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN), American Society for Testing and Materials (ASTM) y Especificaciones Generales para la Construcción de Puentes y Caminos (MOP-001-F-2002).

2.1. Caracterización de los materiales pétreos

Con el fin de obtener una mezcla de buena calidad en cuanto a las propiedades físico-mecánicas, se optó por obtener agregados gruesos y finos de la cantera HOLCIM ubicada en la parroquia Pifo, carretera 28C vía a Papallacta, Km 4. La cual es considerada una de las mejores a nivel nacional por sus propiedades en cuanto a los ensayos realizados a los materiales que distribuyen.

Tomando en cuenta que las propiedades físico-mecánicas de una mezcla asfáltica son representativas en base a sus agregados, estos fueron sometidos a varios ensayos de laboratorio detallado en la Tabla 1, basados en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN y la norma internacional American Society for Testing and Materials ASTM.

Tabla 1. Normas Aplicadas.

Ensayo	Norma
Granulometría de agregados	NTE INEN 969 (ASTM C - 136)
Porcentaje de abrasión	NTE INEN 860 (ASTM C - 131)
Contenido de Humedad Natural	NTE INEN 862 (ASTM C - 566)
Peso unitario suelto y compactado	NTE INEN 858 (ASTM C - 29)
	NTE INEN 857 (ASTM C - 127) Agregado Grueso
Capacidad de absorción	NTE INEN 856 (ASTM C - 128) Agregado Fino

2.1.1. Granulometría de los agregados

Primeramente se recolectó los agregados utilizados para la presente investigación en un muestreo empírico bajo la Norma ASTM D75 – 97, para así proceder con la Norma ASTM C 702 la cual es una práctica que nos ayuda reducir las muestras de árido a tamaño de ensayo y de

esta manera proceder con base en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 696, Análisis Granulométrico en los áridos, fino y grueso, donde se tiene información del tamaño mínimo de la muestra en Kg para proceder con la granulometría del agregado Natural y obtener los resultados deseados como en la Figura 1, además se coloca en una banda granulométrica con base en la Tabla 405-5.1. del MOP-001-F-2002, cumpliendo con las especificaciones deseadas.

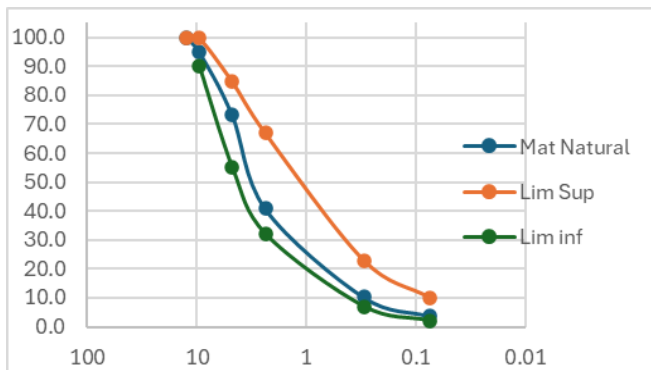


Figura 1. Granulometría Agregado Natural.

Además, se coloca al fresado en una banda granulométrica debido a que tiene distintos tipos de granulometría y sería incontrolable el tamaño de los agregados en la mezcla asfáltica y se lo ubica en base a los límites de la tabla 405-5.1 de la MOP-001-F-2002 como en la Figura 2.

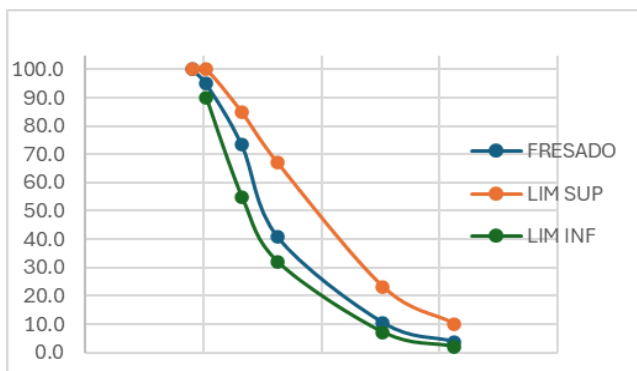


Figura 2. Granulometría Fresado.

2.1.2. Contenido de Humedad Natural

Con base en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 862 y ASTM D2216, se determina el procedimiento a seguir para obtener el contenido de Humedad al ambiente de los agregados, pesando una cantidad de 2000 gramos de cada agregado tanto Natural como Fresado,

insertándolas en capsulas al Horno a 110+/- 5 °C por un tiempo de 24 Horas, posteriormente pesarlas con la capsula, retirar el agregado de la capsula y volviendo a pesarla para determinar el porcentaje del contenido de humedad de las muestras.



Figura 3. Contenido de Humedad Fresado.

2.1.3. Gravedad específica de los agregados

Con base en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 0857, AASHTO T85, ASTM C127 y ASTM C128, ayuda a determinar la densidad, densidad relativa y absorción del agregado grueso para de esta manera obtener las características del agregado Natural y Fresado, mediante el uso de la canasta de alambre para agregados gruesos se determina el peso sumergido, y previo haber dejado el material 24 horas en agua se debe estilar el agua y secar los agregados con una toalla absorbente para determinar el peso en estado Saturado Superficie Seca (SSS) (B), finalmente se procede a dejar 24 horas en el horno a 110+/- 5 °C y establecer el peso seco (A) y el peso sumergido (C), con el fin de obtener los respectivos cálculos y definir la gravedad específica mediante la ecuación 1.

$$\text{Peso ESP Masivo} = \frac{A}{B - C} \quad (1)$$

Además, se determinó el porcentaje de Absorción mediante la ecuación 2.

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100 \quad (2)$$

De igual manera para la gravedad específica de los agregados fino mediante la

norma técnica ecuatoriana NTE INEN 0856 , la cual menciona que se debe dejar en agua una cantidad de 600 gramos aproximadamente durante 24 horas, para proceder a secar la arena mediante un calefactor, el cual ayuda a obtener el peso saturado superficialmente seco del agregado fino con ayuda del cono de Abrahams y el martillo en el cual se dan 25 golpes y enraizar la muestra y de esta manera evaluar el estado como en la figura 4.



Figura 4. Estado SSS del agregado fino.

Una vez determinado el estado SSS del agregado fino se procede a pesar 500 gramos e insertarlo en el picnómetro con ayuda de un embudo e incorporar agua destilada para proceder a sacar los vacíos que tiene la arena con ayuda de la bomba de vacíos como se ve en la Figura 5.



Figura 5. Muestras en el Picnómetro.

Finalmente se procede a dejar en una capsula al horno durante un tiempo de 24 horas a 110+/- 5 °C, con el fin de obtener el peso seco del agregado y de esta manera obtener la gravedad específica de los agregados además de su porcentaje de absorción.

2.1.4. Porcentaje de Abrasión

Con base en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 860 y ASTM C131, detalla el procedimiento a realizar con el fin de obtener el porcentaje de desgaste de los agregados en lo que se denomina “Maquina de los Ángeles”, para lo cual se procede a tomar una muestra para el ensayo de 5000 gramos, en base a la granulometría del agregado se identifica en la tabla 1 de la norma el tamaño máximo y mediante este dato el número de esferas metálicas que se debe colocar en la Maquina de los Ángeles para proceder con el ensayo el cual deberá girar a 500 RPM, una vez finalizado se retira las esferas y tamizar el agregado resultante por el tamiz con abertura de 1.70 mm como se ve en la Figura 6, además de aplicar la ecuación 3.

$$\% \text{ Abrasión} = \frac{W_f * 100}{W_o} \quad (3)$$



Figura 6. Resultados de Abrasión.

2.2. Caracterización del RC-250

El RC-250 es distribuido por Petroecuador, para el cual es diseñado a base de un 70 a 90 % de ligante asfáltico y entre un 10 a 30 % de Nafta, es así como se convierte en un asfalto ideal para mezcla en frío debido a su viscosidad a temperatura relativamente bajas, gracias a ello se convierte en un asfalto diluido siendo muy trabajable a temperatura ambiente in situ.

2.2.1. Ensayo de punto de Inflamación

Se determina el punto de inflamación con base en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 0808 y ASTM D92, siendo una guía en el debido procedimiento para definir los resultados deseados en la copa Cleveland, donde se procede

a poner en contacto con una fuente de lumbré y de esta manera con la ayuda de un termómetro obtendremos la temperatura de inflamación mínima la cual fue de 42 °C como observamos en la Figura 7.



Figura 7. Punto de Inflamación.

2.2.2. Ensayo de viscosidad Cinemática

Con base en la norma ASTM D4402-06, se obtiene el conocimiento previo del proceso de aplicación en la maquina viscosímetro Symbol Brookfield la cual fue precalentada a una temperatura de 60 °C y una velocidad de rotación de 30 RPM, brindándonos los datos de fluidez y cohesión del asfalto residual.

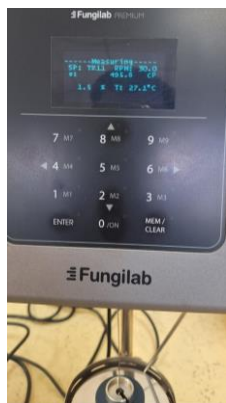


Figura 8. Resultado Viscosidad Cinemática 60 C.

2.3. Fibras de Vidrio

La fibra de vidrio es un material que se obtiene al dejar que el vidrio fundido fluya a través de agujeros muy finos y al solidificarse, adquiere la flexibilidad suficiente para ser utilizada como fibra. Estas fibras, derivadas del estiramiento del silicato fundido, poseen una alta resistencia mecánica debido a su densidad atómica propia,

lo que las hace capaces de resistir tanto a factores de corrosión. Al combinarse con productos sintéticos, la fibra de vidrio adquiere propiedades similares o incluso superiores en resistencia y dureza al metal, manteniendo la ventaja de una buena flexibilidad molecular, similar a la dinámica observada en el hierro y el cemento. [7]

Para la inclusión de fibras de vidrio en una mezcla asfáltica es importante definir sus propiedades, entre ellas se destacan su alta resistencia, a la flexión, compresión y al impacto. Además, este material es muy ligero y no se deforma ante situaciones extremas como el calor, la humedad y el agua.

El material utilizado en el presente estudio tiene un peso de 375 g/m², una resistencia a la tracción de 130 N (ISO 3342-1995), y la estera de hilos están cortados a 50 mm que están uniformemente dispersos como en la Figura 9.



Figura 9. Fibras de vidrio.

2.4. Diseño de la Mezcla Asfáltica en frío

Se aplica el método Marshall Modificado para el diseño de mezclas asfálticas, considerándose como un procedimiento típico para mezclas en frío.

Además, los agregados previamente ya analizados y sometidos a los diferentes ensayos se estudian y en base a un ajuste con los límites de la MOP 001-2002 Tabla 405-5.1, se establece un porcentaje de uso en cuanto a la mezcla de agregados con el uso de un 70% de material natural 3/8 y 30 % de material fresaado 3/8 sumando entre los un 100 % de los agregados pétreos en la mezcla.

Se establece en la normativa ASTM D3515 parámetros para la obtención de una mezcla modificado en cuanto a los agregados como se observa en la Figura 10.

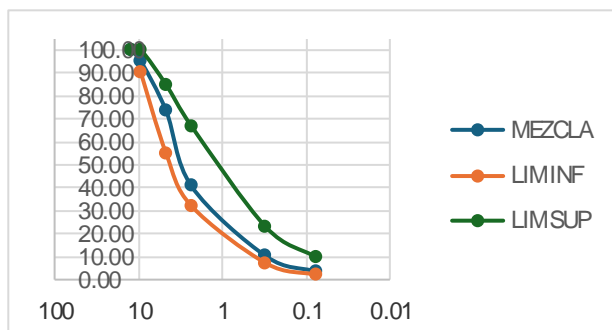


Figura 10. Mezcla modificada de Agregados.

2.4.1. Fabricación de Briquetas in situ

El método Marshall Modificado determina antes la superficie específica de los áridos que deberá recubrir el ligante asfáltico en la mezcla analizada previamente de agregados para lo cual se determina 5 factores provenientes del porcentaje que pasa de la mezcla para aplicarlo en la ecuación 4.

$$S = 0.17G + 0.33g + 2.30A + 12a + 135f \quad (4)$$

Una vez analizada la siguiente ecuación y resuelta con base en los términos antes señalados se calcula un $S=2.33$ para la superficie específica de los áridos, además se debe analizar el factor M el cual es el coeficiente de tráfico que oscila entre 3.75 y 4.25, en base a los límites se define un coeficiente $M=4$, debido a que el diseño de esta mezcla es llevado a cabo con fines de mantenimiento vial.

Como último paso se determina el contenido óptimo teórico de ligante con los datos previamente calculados para así realizar el respectivo análisis de la mezcla previo a su elaboración in situ mediante la ecuación 5.

$$P = M * S^{\frac{1}{5}} \quad (5)$$

Una vez el cálculo arroja un % de peso de asfalto aplicable a la mezcla de $P=4.74\%$, se

recuerda que al trabajar con material fresado el cual previamente ya tiene cierto porcentaje de ligante asfáltico en su composición, para lo cual fue sometido a un ensayo de ignición, proporciona un dato representativo de $P=6.52\%$ del 100% de material fresado.

Con base en lo descrito anteriormente se procede a determinar el contenido de asfalto faltante en nuestra nueva mezcla dándonos una $P=2.78\%$ de asfalto faltante en la mezcla, con un 70 % de material natural correspondiente a 2450 gr y 30 % de material fresado correspondiente a 1050 gr, además que se adoptó diferentes porcentajes de fibras de vidrio a usar como son 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25 % de fibras de vidrio en la mezcla como en la Tabla 2.

Tabla 2. Pesos de los Materiales para la realización de Briquetas.

Asfalto (%)	Asfalto RC-250 (gr)	Fibras de Vidrio (%)	Fibras de Vidrio (gr)	Peso Total Material	Material + RC-250 + Fibra de vidrio
2.78	115.03	0.00	0.00	3500.00	3615.03
2.78	115.33	0.25	9.06	3500.00	3624.39
2.78	115.62	0.50	18.17	3500.00	3633.79
2.78	115.92	0.75	27.32	3500.00	3643.25
2.78	116.22	1.00	36.53	3500.00	3652.75
2.78	116.53	1.25	45.78	3500.00	3662.31
4.74	199.99	0.00	0.00	3500.00	3699.99
4.74	201.05	0.50	18.60	3500.00	3719.65

2.5. Procedimiento en laboratorio

Con base en la metodología Marshall Modificado, se determina sus respectivos pesos y se procede con la compactación de briquetas en base con la Tabla 405.5.4 de la MOP-001-F-2002, la cual determina que para un tráfico Pesado se debe realizar un total de 75 golpes por cara con el martillo compactador como en la Figura 11, se deberá esperar un tiempo de curado de 72 horas como mínimo, para así proceder con posteriores ensayos a la mezcla asfáltica.



Figura 11. Realización de Briquetas.

2.5.1 Ensayo de gravedad específica Bulk

Con base en la normativa ASTM C 29 se analiza el procedimiento para el ensayo de densidad Bulk en el cual se procedió a tomar los pesos de cada briqueta al Aire (W_a), sumergida en el agua (W_w) y Saturada de Superficie seca (W_{ss}) como en la Figura 12, mediante la determinación de estos pesos elaborar una tabla de resultados para el método Marshall Modificado y la ecuación 6.

$$Bulk = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w} \quad (6)$$



Figura 12. Procedimiento Bulk.

2.5.2. Ensayo de Estabilidad y Flujo

Con base en el método Marshall Modificado y la normativa ASTM D 6927, la cual establece el conocimiento del procedimiento a llevar para determinar la estabilidad y el flujo de las Briquetas como en la Figura 13, obteniendo los resultados para el respectivo análisis del método Marshall modificado.

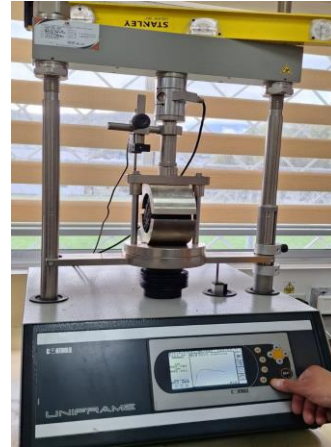


Figura 13. Resultados de Estabilidad y Flujo.

2.5.3. Ensayo de densidad máxima teórica Rice

Se determina la densidad Rice con base en las normas ASTM D 2041 y AASHTO T 209 del método Marshall Modificado para el cual se puso a prueba por porcentajes de fibras de vidrio puesta en las briquetas dando lugar a 8 ensayos de los cuales primero se debe pesar una muestra disgregada de las briquetas denominada así como Masa de la Muestra al Aire (A), durante el ensayo se deberá seguir el procedimiento antes analizado y determinar el peso de la Masa del Frasco + Agua a 25 C + Muestra conocido como (C) y se deberá determinar la Masa del frasco + Agua a 25 C y aplicar la ecuación (Ecuación 7) para obtener el valor Rice.

$$\frac{A}{B - C} \quad (7)$$

Finalmente se realiza el procedimiento de la densidad Rice aguardando esperar los resultados, como la figura 14.



Figura 14. Procedimiento Rice

2.5.4. Evaluación de la pérdida de ligante mediante el uso de horno de ignición

Con base en la normativa AASHTO T 308 - 22 y ASTM D6307 - 19, se adquiere el conocimiento del procedimiento a llevar a cabo para conocer así el porcentaje teórico de asfalto que tiene tanto el fresado usado para la mezcla como las briquetas realizadas, evaluando así el proceso y los cálculos antes mencionados, cumpliendo con el porcentaje teórico de asfalto calculado para cada briquea.



Figura 15. Horno de Ignición.

3. Resultados y Discusión

3.1. Resultados de Gravedad específica y porcentaje de absorción

Con base en la metodología aplicada y el proceso basado en las normativas recomendadas se obtuvo los resultados deseados en cuanto a la gravedad específica y el porcentaje de absorción del agregado natural grueso, con el fin de determinar las propiedades físico-mecánicas de los agregados y de esta manera realizar un cálculo exacto en cuanto al diseño de la mezcla, finalmente se obtuvo una gravedad específica de 2.66 g/cm³ y un porcentaje de absorción del 3.60 % como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Gravedad específica del Material Natural Grueso.

Gravedad específica Mat Grueso Natural	
Peso muestra seca SSS (B) [gr]	2500.82
Peso muestra sumergido (C) [gr]	1507.83
Cápsula #	1
Peso cápsula + muestra seca [gr]	2828
Peso cápsula [gr]	414
Peso muestra seca (A) [gr]	2414
A-C	906.17
B-C	992.99
B-A	86.82
PESO ESP MASIVO	2.43
PESO ESP SSS	2.52
PESO ESP	2.66
% Absorción	3.60

De igual manera se adquiere los resultados del material fresado grueso con una gravedad específica de 2.37 g/cm³ y un porcentaje de absorción del 8.64 %, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Gravedad específica del Material Fresado.

Gravedad específica Mat Fresado	
Peso muestra seca SSS (B) [gr]	2500.8
Peso muestra sumergido (C) [gr]	1329.07
Cápsula #	2
Peso cápsula + muestra seca [gr]	2524
Peso cápsula [gr]	222
Peso muestra seca (A) [gr]	2302
A-C	972.93
B-C	1171.73
B-A	198.8
PESO ESP MASIVO	1.96
PESO ESP SSS	2.13
PESO ESP	2.37
% DE Absorción	8.64

Se determina de igual manera la gravedad específica de la arena natural es 2.70 g/cm³ y el porcentaje de absorción es del 2.91 %, como se muestra en la Tabla 6, con el fin de identificar sus propiedades físico-mecánicas y realizar una comparación con el material fresado presentado en la Tabla 7 en cuanto a sus resultados

considerando antes que el fresado lleva un posterior contenido de asfalto.

Tabla 6. Gravedad específica Arena Natural

Gravedad específica Arena Natural		
Peso seca SSS [gr]	(B)	500.01
Picnómetro #		1
Peso picnómetro [gr]	(2)	151.09
Volumen picnómetro	(V)	499.52
Peso Pic. + Agua + Muestra	(1)	956.77
Cápsula #		1
Peso cápsula + muestra seca [gr]		567.44
Peso cápsula [gr]		76.51
Peso muestra seca	(A)	490.93
1-(2+B)	(W)	305.67
V-W		193.85
500-A		9.07
(V-W)-(500-A)	(X)	184.78
Peso ESP Masivo	A/(V-W)	2.53
Peso ESP Masivo SSS	500/(V-W)	2.58
Peso ESP Solidos	A/X	2.66
% Absorción	(500-A)*100/A	1.85

La gravedad específica de la arena proveniente del material fresado es igual a 2.41 g/cm³, además de su porcentaje de absorción de 1.85 %, llevándonos a realizar una conclusión.

Tabla 7. Gravedad específica del Fresado

Gravedad específica Fresado		
Peso seca SSS [gr]	(B)	500.01
Picnómetro #		10
Peso picnómetro [gr]	(2)	151.09
Volumen picnómetro	(V)	499.52
Peso Pic. + Agua + Muestra	(1)	937.66
Cápsula #		1
Peso cápsula + muestra seca [gr]		566.36
Peso cápsula [gr]		80.51
Peso muestra seca	(A)	485.85
1-(2+B)	(W)	286.56
V-W		212.96
500-A		14.15
(V-W)-(500-A)	(X)	198.81
Peso ESP Masivo	A/(V-W)	2.28
Peso ESP Masivo SSS	500/(V-W)	2.35
Peso ESP Solidos	A/X	2.44
% Absorción	(500-A)*100/A	2.91

3.2. Resultados de Porcentaje de Abrasión

Con base en la normativa se lleva a cabo el respectivo procedimiento para realizar el cálculo del porcentaje de desgaste usando la ecuación 3 para el material fresado y el material natural, arrojando un porcentaje de desgaste del 31.79 % del material fresado como se muestra en la Tabla 8, recalcando que este material ya tuvo posteriores esfuerzos de abrasión.

Tabla 8. Abrasión del Material Fresado.

Material Fresado	
W (gr)	5000.45
W tamiz 12	3410.71
% Desgaste	31.792

Una vez determinado el porcentaje de desgaste del material fresado se procede con el material natural el cual da un porcentaje de desgaste de 19.956 % como se observa en la Tabla 9, tomando en cuenta que es un material muy bueno en cuanto a sus propiedades de resistencia a la abrasión ya que proviene de piedra triturada.

Tabla 9. Abrasión del Material Natural

Material Natural Grueso	
W (gr)	5000.43
W tamiz 12	4002.56
% Desgaste	19.956

3.3. Ensayo de densidad Bulk

Con base en la normativa y el procedimiento llevado anteriormente se tomó los resultados del ensayo Bulk (Gmb), para lo cual se peso cada briqueta una vez transcurrido el tiempo respectivo de curado, tomando lectura de los siguientes pesos: peso al aire (Wa), peso sumergido en agua (Ww) y peso saturado superficialmente seco (Wss), los cuales deben ser tomados en el orden respectivo como se muestra en la Tabla 10, lo datos tomados nos sirven de utilidad para determinar datos como el volumen de vacíos (Vv) y el volumen de cada briqueta mediante la ecuación 5.

Tabla 10. Datos del Ensayo Bulk

CONTENIDO DE ASFALTO	FIBRA DE VIDRIO	BRIQUETA N°	PESO (gramos)			
			Aire (Wa)	Saturado (Wss)	Agua (Ww)	Volumen (cm3)
2.78%	0.00%	1	1034.27	1082.85	574.04	508.81
		2	983.10	1028.07	546.38	481.69
		3	784.75	820.19	421.80	398.39
2.78%	0.25%	1	979.08	1024.31	531.20	493.11
		2	987.66	1032.37	539.28	493.09
		3	987.17	1029.97	534.97	495.00
2.78%	0.50%	1	981.62	1025.18	531.21	493.97
		2	987.47	1025.89	513.50	512.39
		3	991.35	1031.64	511.03	520.61
2.78%	0.75%	1	973.28	1013.92	517.70	496.22
		2	983.50	1026.27	511.52	514.75
		3	979.04	1020.42	507.30	513.12
2.78%	1.00%	1	821.08	913.00	473.92	439.08
		2	917.13	921.15	460.77	460.38
		3	960.10	987.50	491.90	495.60
2.78%	1.25%	1	982.80	1022.24	493.31	528.93
		2	984.75	1024.84	490.55	534.29
		3	984.48	1021.20	470.90	550.30
4.74%	0.00%	1	986.64	1029.55	540.44	489.11
		2	986.16	1024.93	539.73	485.20
		3	987.36	1050.00	540.10	509.90
4.74%	0.50%	1	986.14	1025.23	519.46	505.77
		2	980.54	1018.70	515.50	503.20
		3	985.82	1027.84	518.47	509.37

3.4. Resultados del ensayo de Estabilidad y Flujo

Mediante el procedimiento dado anteriormente se define los resultados de cada briqueeta en cuanto a su estabilidad medida en kilo newtons y el flujo medido en milímetros como se observa en la Tabla 11, los cuales deberán ser transformados y corregidos mediante la Tabla No. 405.5.3. de la MOP-001-F-2002 para realizar un minucioso análisis competitivo con las fibras de vidrio y elaborar las gráficas correspondientes al Método Marshall Modificado.

Tabla 11. Estabilidad y flujo

% ASFALTO	% FIBRA DE VIDRIO	BRIQUETA N°	ESTABILIDAD	FLUJO
			Medida (kN)	Medida (mm)
2.78%	0.00%	1	8.233	3.258
		2	6.602	13.852
		3	4.801	2.551
		\bar{X}	6.545	6.554
2.78%	0.25%	1	8.516	8.656
		2	5.523	6.391
		3	6.795	7.061
		\bar{X}	7.02	7.369
2.78%	0.50%	1	7.882	6.472
		2	8.558	7.641
		3	9.045	8.208
		\bar{X}	8.495	7.44
2.78%	0.75%	1	4.751	6.937
		2	5.421	9.32
		3	5.846	9.757
		\bar{X}	5.339	8.671
2.78%	1.00%	1	2.21	10.73
		2	3.121	11.214
		3	3.921	12.587
		\bar{X}	3.084	11.51
2.78%	1.25%	1	6.147	5.656
		2	5.876	7.795
		3	5.89	15.359
		\bar{X}	5.971	9.603
4.74%	0.00%	1	4.406	6.495
		2	5.609	4.722
		3	6.088	4.633
		\bar{X}	5.368	5.283
4.74%	0.50%	1	5.054	7.312
		2	6.088	15.797
		3	4.914	7.504
		\bar{X}	5.352	10.204

3.5. Resultados del ensayo Rice

Finalmente, el ensayo Rice nos proporciona el valor denominado Gmm el cual es determinado en base a la ecuación 5, determinando los valores de la tabla 12, siendo un dato importante para las siguientes figuras del Método Marshall Modificado.

Tabla 12. Valores Rice

% Asfalto	% Fibras de Vidrio	Rice
2.78	0	2.40
2.78	0.25	2.39
2.78	0.5	2.45
2.78	0.75	2.42
2.78	1	2.43
2.78	1.25	2.40
4.74	0	2.25
4.74	0.5	2.42

3.6. Resultados Método Marshall Modificado

Tabla 13. Resultados Finales

Asfalto %	Fibras de Vidrio %	Bulk	Estabilidad corregida (Lbs)	Flujo 1/10 0"	Vv (%)	VMA (%)	VFA (%)
2.78	0.00	2.02	1751.03	26	15.99	18.29	12.57
2.78	0.25	1.99	1720.08	29	16.69	19.44	14.15
2.78	0.50	1.94	1986.15	29	20.92	21.85	4.29
2.78	0.75	1.93	1248.35	34	20.38	22.57	9.71
2.78	1.00	1.93	825.04	45	20.40	22.51	9.37
2.78	1.25	1.83	1248.38	38	23.75	26.84	11.49
4.74	0.00	2.00	1315.31	21	11.33	20.82	45.58
4.74	0.50	1.94	1251.31	40	19.76	23.24	14.98

3.6.1. Fibras de Vidrio vs Estabilidad

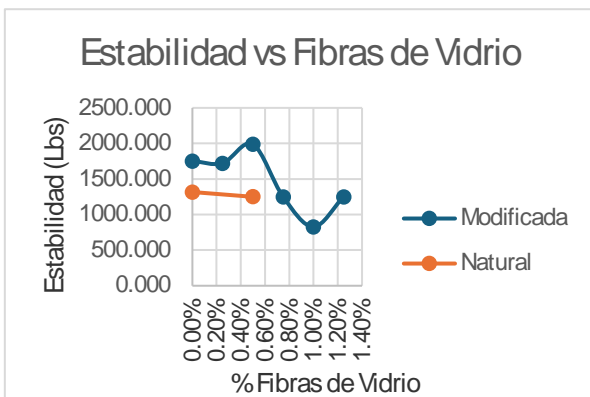


Figura 16. Fibras de Vidrio vs Estabilidad

3.6.2. Fibras de Vidrio vs Flujo

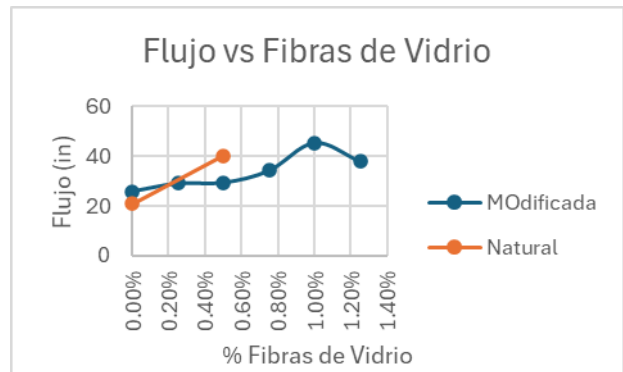


Figura 17. Fibras de Vidrio vs Flujo

3.6.3. Fibras de Vidrio vs Bulk

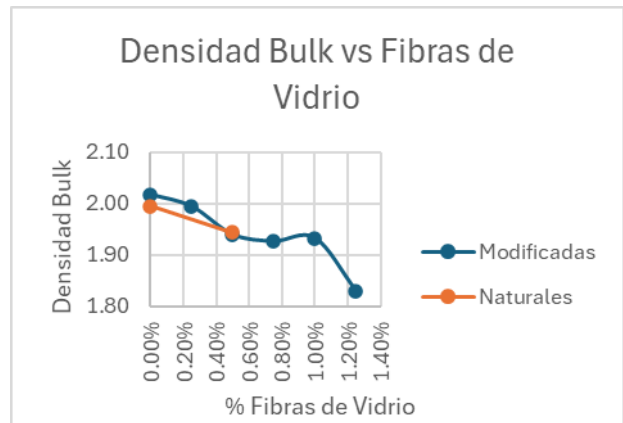


Figura 18. Fibras de Vidrio vs Bulk

3.6.4. Fibras de Vidrio vs Vv

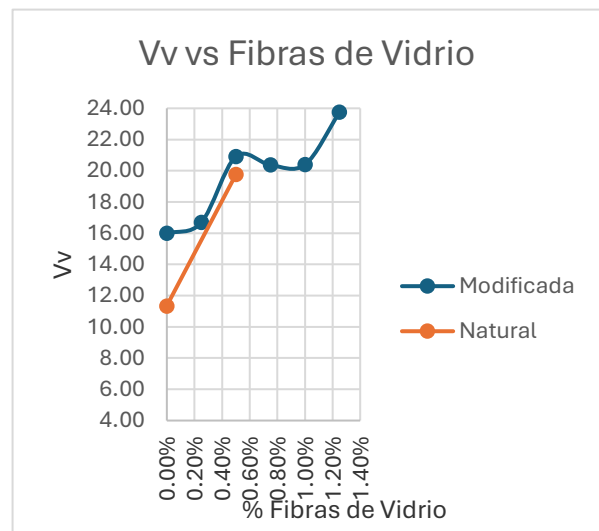


Figura 19. Fibras de Vidrio vs Vv

3.6.5. Fibras de Vidrio vs Vfa

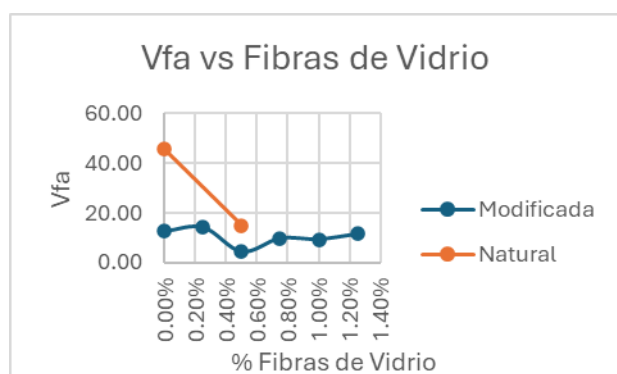


Figura 20. Fibras de Vidrio vs Vfa

3.6.6. Fibras de Vidrio vs Vacíos agregados

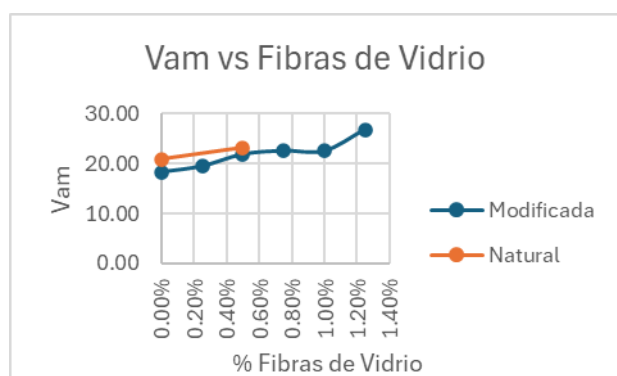


Figura 21. Fibras de Vidrio vs Vam

4. Conclusiones

El porcentaje de absorción del agregado grueso proveniente del material de fresado es superior al del material natural, sin embargo, el momento de someterlos al proceso de secado el material de fresado no alcanza a secarse en su totalidad como lo logra el material natural, todo ello debido a la película de ligante localizada en la superficie del mismo, que al tener contacto con el calor se funde sobre las partículas, evitando que el agua localizada en los intersticios salga.

El material natural presenta una resistencia optima con el 19.956 % de desgaste respecto al material fresado el cual presenta el 31.792 % de desgaste, tomando en cuenta que el RAP ya fue sometido a esfuerzos de abrasión por el tráfico vehicular, el material es considerado

bueno mientras sea menor o igual al 40% de desgaste.

En base al desarrollo experimental llevado a cabo, se tiene como porcentaje máximo para el material de fresado el 30% del total de la mezcla, debido a que existe la incertidumbre del origen de este material ya que es apilado en masa y proviene de distintos puntos de la ciudad, de vías cuyos años de servicio y tráfico se desconocen. Si se considera hacer uso de porcentajes superiores a dicho porcentaje la mezcla presentará mayor dificultad de preparación por el bajo contenido de asfalto diluido.

Al realizar la mezcla asfáltica modificada con un porcentaje de fibra al 0% se presenció dificultad al incorporar los agregados con el ligante, pero ya al tener presencia de fibras de vidrio con una longitud de 5 cm mejoró notablemente la trabajabilidad al preparar la mezcla. Es importante mencionar que las fibras de vidrio deben añadirse de manera paulatina una vez que se cuente con la mezcla de agregados + ligante, caso contrario las fibras absorberán el ligante asfáltico y la incorporación de la mezcla tardara más

El RC-250 es un asfalto diluido que es expansivo y sensible ante el calor, solamente con temperaturas superior a los 30 grados empieza a comportarse como un liquido mas fluido, dando como resultado una mezcla con poca cohesión, este efecto es contrarrestado en gran medida por las fibras de vidrio que otorgando mayor firmeza a la mezcla.

Esta nueva combinación de mezcla es una alternativa que optimiza el uso de ligante ya que el fresado contiene un porcentaje de asfalto residual que se determina con el horno de ignición, además el material reciclado propuesto reduce el uso de agregados provenientes de canteras.

En base a la Tabla 405.5.4 de la MOP-001-F-2002 la estabilidad mínima deberá ser de 1800 Lb, para lo cual se cumplió con la estabilidad requerida en la briqueta fabricada con 2.78 % de RC-250 y 0.50 % de Fibras de

vidrio, con un resultado de 1986.15 Lb, además el flujo requerido es aceptable en las mezclas que incluyen fibras de vidrio debido a que se encuentra en un límite de 30 a 55 pulgada sobre cien.

Los vacíos de agregados minerales cumplen en todas las mezclas en base a la Tabla 405-5.5 del MOP-001-F-2002, debido a que el porcentaje mínimo presentado es del 15% y las muestras de cada mezcla superan el límite inferior.

Con base en la totalidad de la mezcla el ahorro de material pétreo natural será del 28.90 %, de igual manera se considera que el fresado tiene cierto contenido de asfalto en la mezcla para lo cual se obtiene un ahorro de 2.223%.

La inversión económica en las fibras de vidrio es baja considerando que la cantidad corresponde al 0.50 % de la totalidad de la mezcla, con un precio que rodea los \$1.95 USD/kg (Quito-Ecuador Año 2024). Si consideramos que el beneficio es mejorar la estabilidad de la mezcla, no requerimos de una inversión capaz de desequilibrar económicamente un proyecto de mantenimiento vial.

Referencias

- [1] S. Novillo, J. Aguirre, “Determinación del estado actual del pavimento articulado de las calles 10 de agosto y guayaquil sector centro histórico de la ciudad de Riobamba para la elaboración de un plan de mantenimiento vial” Proyecto de titulación, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. Feb. 2009.
- [2] A. Coopeland, Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice (Publication No. FHWA-HRT-11-021), 2011.
- [3] F. Miranda, J. Aguiar, “Mezclas asfálticas con RAP: pavimentos asfálticos reciclados” [online]. Costa Rica: LanammeUCR, 2019 Disponible en: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1421/Boletin%201%20%20Mezclas%20asf%C3%A1lticas%20con%20RAP.pdf?sequence=1>
- [4] M. Carillo, O. Ipiates “Estudio de mezclas asfálticas en frío modificadas con fibras de vidrio” Proyecto de titulación, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador. 2022.
- [5] A. Quispe, “Aplicación de fibras de vidrio en el diseño de mezcla asfáltica en caliente para rehabilitar pavimentos flexibles en Juliaca, 2021”, Universidad Cesar Vallejo, Lima, Perú. 2021.
- [6] J. Méndez, E. Torres “Diseño de una mezcla asfáltica en frío reutilizando material asfáltico fresado (RAP) e incorporando fillers comerciales (cal hidratada/cemento) por vía seca.” Proyecto de titulación, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador. 2022.
- [7] F. Rojas, “Propuesta técnica del proceso de laminado manual en plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) en la fabricación de elementos utilitarios” Proyecto de titulación, Universidad Internacional del Ecuador, Loja, Ecuador. Jul. 2013.
- [8] ASTM Internacional, ASTM D75 “Aggregate sampling”, West Conshohocken, 2021.
- [9] ASTM Internacional, ASTM C702 “Test method for reducing aggregate samples to test size”, West Conshohocken, 2021.
- [10] Instituto Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 696, “Áridos, Análisis Granulométrico en los Áridos Fino y Grueso”, Quito, 2011.
- [11] Instituto Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 862, “Áridos para Hormigón determinación del contenido total de Humedad”, Quito, 2011.
- [12] ASTM Internacional, ASTM D2216 “Moisture content”, West Conshohocken, 2021.
- [13] Instituto Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 0857, «Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y

- absorción del árido grueso.» Quito, 2010.
- [14] Instituto Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 856, “Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino”, Quito, 2010.
- [15] American Association of State Highway and Transport Officials, AASHTO T85, “Specific Gravity of coarse aggregate”, 2017.
- [16] ASTM Internacional, ASTM C127 “Density and Absorption of Coarse Aggregate”, West Conshohocken, 2021.
- [17] ASTM Internacional, ASTM C128 – 07 “Standard test method for determining the density, relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate.”, West Conshohocken, 2021.
- [18] Instituto Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 0860, “Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5mm mediante el uso de la máquina de los ángeles”, Quito, 2011.
- [19] ASTM Internacional, ASTM C131 “Standard Test Method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine”, West Conshohocken, 2006.
- [20] Instituto Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 0808, “Productos de Petróleo. Determinación de los Puntos de Inflamación y combustión en vaso abierto Cleveland”, Quito, 2010.
- [21] ASTM Internacional, ASTM D92 “Standard Test Method for Flash and Fire Points Performed by the Cleveland Open Cup Tester”, West Conshohocken, 2021.
- [22] ASTM Internacional, ASTM D4402-06 “Standard Test Method for Viscosity Determination of asphalt at Elevated temperatures Using a Rotational Viscometer”, West Conshohocken, 2021.
- [23] INVE-729-13, “Método para determinar el contenido de asfalto de mezclas en caliente por ignición” [online]. Bogotá, 2013, Disponible en: <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-729-13.pdf>
- [24] ASTM Internacional, ASTM D3515 “Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous paving Mixtures”, West Conshohocken, 2009.
- [25] ASTM Internacional, ASTM C29 “Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate”, West Conshohocken, 2017.
- [26] ASTM Internacional, ASTM D6927 “Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures”, West Conshohocken, 2022.
- [27] ASTM Internacional, ASTM D2041 “Standard Test Method for Maximum Theoretical Specific Gravity and Density of Asphalt Paving Mixtures”, West Conshohocken, 2021.
- [28] American Association of State Highway and Transport Officials, AASHTO T 209, “Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Asphalt Mixture”, 2023.
- [29] American Association of State Highway and Transport Officials, AASHTO T 308-22, “Determining the Asphalt Binder Content of Asphalt Mixtures by the Ignition Method”, 2022.
- [30] ASTM Internacional, ASTM D6307 “Determination of Asphalt Content by Ignition Method”, West Conshohocken, 2019.