



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

TEMA:

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO
MEZCLADO CON FIBRA DE VIDRIO, UTILIZANDO EL ENSAYO
MARSHALL”**

AUTOR: Erick Nicolás Bonilla Bravo

TUTOR: Ing. Fricson Lutgardo Moreira Cedeño, Mg.

AMBATO – ECUADOR

Febrero – 2024

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad como tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, con el tema: **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO MEZCLADO CON FIBRA DE VIDRIO, UTILIZANDO EL ENSAYO MARSHALL”**, elaborado por el Sr. Erick Nicolás Bonilla Bravo, portador de la cédula de ciudadanía C.I. 2200452684, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, febrero 2024



.....
Ing. Fricson Lutgardo Moreira Cedeño, Mg.

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Erick Nicolás Bonilla Bravo** con C.I. 2200452684 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente Trabajo Experimental con el tema: **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO MEZCLADO CON FIBRA DE VIDRIO, UTILIZANDO EL ENSAYO MARSHALL”**, así como también los análisis comparativos, gráficas, tablas, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva autoridad, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el presente trabajo.

Ambato, febrero 2024



.....
Erick Nicolás Bonilla Bravo

C.I. 2200452684

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y proceso de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo Experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, febrero 2024



.....
Erick Nicolás Bonilla Bravo

C.I. 2200452684

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental, realizado por el estudiante Erick Nicolás Bonilla Bravo de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO MEZCLADO CON FIBRA DE VIDRIO, UTILIZANDO EL ENSAYO MARSHALL”.

Ambato, febrero 2024

Para constancia firman:



.....
Ing. Byron Genaro Cañizares Proaño, Mg.
MIEMBRO CALIFICADOR



.....
Ing. Diego Sebastián Chérrez Gavilanes, Mg.
MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

Este trabajo rinde homenaje a todos aquellos cuyo apoyo y esfuerzo fueron fundamentales a lo largo de mi extensa carrera como estudiante.

En primer lugar, quiero expresar mi sincera gratitud a mis padres, quienes han sido un ejemplo constante de sacrificio y dedicación, siempre fomentando el deseo de superación, y su apoyo inquebrantable ha sido fundamental en cada paso.

A mis abuelos, que a lo largo de los años han sido una fuente de sabiduría y cariño, sus valores y experiencias han dejado una huella profunda en mi corazón y me han enriquecido de formas inimaginables.

AGRADECIMIENTO

En este momento de culminación académica, quiero expresar mi sincero agradecimiento a Dios, quien ha sido mi guía constante a lo largo de este viaje, brindándome la fuerza y las ganas necesarias para superar cada obstáculo que he afrontado a lo largo de mi vida.

Agradezco de corazón a mis padres, quienes han sido un regalo invaluable de Dios en mi vida. Su amor incondicional, orientación y sacrificios han sido pilares fundamentales en mi formación y desarrollo.

A mi tutor, por su orientación, paciencia y apoyo a lo largo de mi trabajo, sus valiosas sugerencias y comentarios constructivos han fortalecido mi trabajo.

A la Universidad Técnica de Ambato, por proporcionar recursos y un entorno académico propicio para llevar al cabo la investigación.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE GRÁFICAS	xiii
RESUMEN EJECUTIVO	xiv
ABSTRACT	xv
CAPITULO I.- MARCO TEÓRICO	1
1.1 Antecedentes Investigativos	1
1.1.1. Antecedentes	1
1.2 Objetivos	5
1.2.1. Objetivo General	5
1.2.2. Objetivos Específicos	5
CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA.	6
2.1 Materiales.....	6
2.2 Métodos	8
2.2.1 Granulometría de agregados.....	8
2.2.2 Gravedad específica de agregados finos.....	9
2.2.3 Gravedad específica de agregados gruesos	12
2.2.4 Abrasión o desgaste del agregado grueso.....	14
2.2.5 Dosificación de las briquetas.....	16
2.2.6 Elaboración de briquetas	16

2.2.7	Ensayo Marshall	17
2.2.7.1	Determinación del peso específico “bulk”	17
2.2.7.2	Peso específico máximo teórico.....	18
2.2.7.3	Análisis de densidad y vacíos	19
2.2.7.4	Porcentaje de asfalto absorbido por peso del agregado seco	20
2.2.7.5	Porcentaje en volumen del agregado con respecto al volumen total	20
2.2.7.6	Porcentaje de vacíos con aire respecto al volumen total.....	21
2.2.7.7	Volumen de asfalto efectivo como porcentaje de volumen total	21
2.2.7.8	Porcentaje de vacíos que contienen los agregados de la mezcla.....	21
2.2.7.9	Contenido de asfalto efectivo con respecto al peso de la mezcla	21
2.2.7.10	Porcentaje de vacíos llenos de asfalto.....	22
2.2.7.11	Ensayo de estabilidad y flujo.....	22
2.2.7.12	Corrección de estabilidad por altura	23
2.2.8	Determinación de contenido óptimo de cemento asfáltico.....	24
2.2.9	Dosificación de la fibra de vidrio	25
2.2.10	Elaboración de briquetas (mezcla asfáltica con fibras de vidrio)	26
2.2.11	Ensayo Marshall para las briquetas (mezcla asfáltica con fibras de vidrio)	27
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN		29
3.1	Análisis y discusión de los resultados.	29
3.1.1	Granulometría de los agregados	30
3.1.2	Dosificación propuesta	31
3.1.3	Gravedad específica de agregados finos.....	33
3.1.4	Gravedad específica de agregados gruesos	34
3.1.5	Gravedad específica resumida de los agregados	35
3.1.6	Abrasión o desgaste del agregado grueso.....	36
3.1.7	Diseño Marshall de la mezcla asfáltica tradicional	37
3.1.7.1	Peso Específico “bulk”	37
3.1.7.2	Peso específico máximo teórico.....	37
3.1.7.3	Determinación de Rice.....	38

3.1.7.4	Porcentaje de asfalto absorbido por peso del agregado seco	38
3.1.7.5	Porcentaje en volumen del agregado con respecto al volumen total	39
3.1.7.6	Porcentaje de vacíos con aire respecto al volumen total.....	39
3.1.7.7	Volumen de asfalto efectivo como porcentaje de volumen total	40
3.1.7.8	Porcentaje de vacíos que contienen los agregados de la mezcla.....	40
3.1.7.9	Contenido de asfalto efectivo con respecto al peso de la mezcla	41
3.1.7.10	Porcentaje de vacíos llenos de asfalto.....	41
3.1.7.11	Corrección de estabilidad por altura	42
3.1.8	Determinación del contenido óptimo de asfalto para mezclas asfálticas tradicional	43
3.1.9	Diseño Marshall de la mezcla asfáltica con fibra de vidrio.....	47
3.1.9.1	Dosificación de la fibra	47
3.1.9.2	Peso Específico “bulk”	48
3.1.9.3	Peso específico máximo teórico.....	48
3.1.9.4	Determinación de Rice.....	49
3.1.9.5	Porcentaje de asfalto absorbido por peso del agregado seco	49
3.1.9.6	Porcentaje en volumen del agregado con respecto al volumen total	50
3.1.9.7	Porcentaje de vacíos con aire respecto al volumen total.....	50
3.1.9.8	Volumen de asfalto efectivo como porcentaje de volumen total	51
3.1.9.9	Porcentaje de vacíos que contienen los agregados de la mezcla.....	51
3.1.9.10	Contenido de asfalto efectivo con respecto al peso de la mezcla	51
3.1.9.11	Porcentaje de vacíos llenos de asfalto.....	52
3.1.9.12	Corrección de estabilidad por altura	52
3.1.9.13	Determinación del contenido óptimo de fibra de vidrio para mezclas asfálticas	57
3.2	Verificación de hipótesis	63
CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		64
4.1	Conclusiones.....	64
4.2	Recomendaciones	66

MATERIALES DE REFERENCIA	67
Referencias Bibliográficas	67
Anexos	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentajes granulométricos	9
Tabla 2. Masa mínima de la muestra de ensayo.....	12
Tabla 3. Especificaciones para el ensayo de abrasion.....	15
Tabla 4. Factores de corrección de la estabilidad	24
Tabla 5. Criterios de diseño para mezclas Marshall.	25
Tabla 6. Granulometría de los agregados.....	30
Tabla 7. Mezcla propuesta	31
Tabla 9. Densidad del agregado grueso	34
Tabla 10. Resumen de gravedades específicas de los agregados.....	35
Tabla 11. Desgaste del agregado grueso	36
Tabla 12. Densidad Rice	38
Tabla 13. Ensayo Marshall para briquetas de mezcla asfáltica tradicional.....	43
Tabla 14. Resumen resultados obtenido por las gráficas por metodología Marshall.....	46
Tabla 15. Dosificación de la fibra de vidrio en la mezcla.....	47
Tabla 16. Determinación de Rice de mezclas asfálticas con fibra de vidrio.....	49
Tabla 17. Ensayo Marshall para briquetas de mezcla asfáltica con fibra de vidrio	56
Tabla 18. Resumen de propiedades marshall para el contenido óptimo de fibra de vidrio	57
Tabla 19. Propiedades Marshall de las mezclas asfálticas	58
Tabla 20. Comparación de resultados de obtenidos en hormigón asfáltico tradicional...	61
Tabla 21. Comparación de resultados de obtenidos en hormigón asfáltico con fibras de vidrio	62

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Ensayo de Granulometría.....	8
Gráfica 2. Extracción de aire del picnómetro.....	11
Gráfica 3. Remojo de los agregados gruesos	13
Gráfica 4. Ensayo de abrasión.....	14
Gráfica 5. Preparación de los materiales para la mezcla asfáltica	16
Gráfica 6. Compactación de la muestra	17
Gráfica 7. Baño María de las briquetas a 25 °C	18
Gráfica 8. Ensayo Rice.....	19
Gráfica 9. Ensayo de Estabilidad y Flujo.....	23
Gráfica 10. Mezcla de agregados con fibra de vidrio	27
Gráfica 11. Curva granulométrica del agregado	31
Gráfica 12. Curva granulométrica de la mezcla propuesta	32
Gráfica 13. Peso específico Bulk vs % Cemento asfáltico	43
Gráfica 14. Vacíos con aire vs % Cemento asfáltico	43
Gráfica 15. Vacíos agregado mineral vs % Cemento asfáltico.....	44
Gráfica 16. Flujo vs % Cemento asfáltico	44
Gráfica 17. Estabilidad vs % Cemento asfáltico.....	45
Gráfica 18. Vacíos llenos de asfalto vs % Cemento asfáltico.....	45
Gráfica 19. Briquetas compactadas.....	46
Gráfica 20. Briquetas con fibra de vidrio.....	47
Gráfica 21. Comparación de vacíos con aire de los mezclas asfálticas	58
Gráfica 22. Comparación de estabilidad de los mezclas asfálticas.....	59
Gráfica 23. Comparación de vacíos en agregado mineral de los mezclas asfálticas	59
Gráfica 24. Comparación de vacíos rellenos de asfalto de los mezclas asfálticas.....	60
Gráfica 25. Comparación en agregados minerales aire de los mezclas asfálticas	60

RESUMEN EJECUTIVO

El uso generalizado de hormigón asfáltico tradicional, con el pasar del tiempo ha evidenciado un deterioro en las carreteras debido al tráfico vehicular, clima y falta de mantenimiento. Reconociendo esto, se buscó mejorar con técnicas innovadoras y nuevos materiales para lograr mayor resistencia, durabilidad, reducción de costos y tiempos de mantenimiento más cortos en las vías.

En este trabajo se obtuvo una muestra en la cantera Salvador, a los agregados se realizaron una serie de ensayos para determinar si son aptos o no para el desarrollo de briquetas asfálticas como son: granulometría, gravedad específica de agregados finos, gravedad específica de agregados gruesos y abrasión o desgaste del agregado grueso. Se incorporó fibra de vidrio en la mezcla asfáltica mediante metodología Marshall, se obtuvo el contenido óptimo de cemento asfáltico realizando tres briquetas para cada uno de los porcentajes 5.00, 5.50, 6.00, 6.50 y 7.00 por ciento, dando como resultado un contenido óptimo de 6.45 por ciento, mientras que para obtener el porcentaje óptimo de fibra de vidrio se compararon los resultados obtenidos para porcentajes de 5.00, 7.50, 10.00, 15.00 y 25.00 por ciento, siendo 5.00 por ciento el de mejores características y propiedades.

Una vez completadas todas las fases de la investigación, se concluye que el hormigón asfáltico con fibra de vidrio presenta 11.05 por ciento menos estabilidad que el hormigón asfáltico tradicional, y en cuanto a sus otras propiedades todas cumplen los criterios Marshall, exceptuando los vacíos llenos de asfalto superándolo en 5.50 por ciento.

Palabras claves: Cemento asfáltico, hormigón asfáltico, mezcla asfáltica, fibra de vidrio, agregados.

ABSTRACT

The widespread use of traditional asphalt concrete over time has revealed deterioration in roads due to vehicular traffic, weather conditions, and a lack of maintenance. Recognizing this, efforts have been made to improve with innovative techniques and new materials to achieve greater strength, durability, cost reduction, and shorter maintenance times on roads.

In this study, a sample was obtained from the Salvador quarry, and a series of tests were conducted on the aggregates to determine their suitability for the development of asphalt briquettes. These tests included particle size distribution, specific gravity of fine aggregates, specific gravity of coarse aggregates, and abrasion or wear of coarse aggregates. Fiberglass was incorporated into the asphalt mixture using the Marshall methodology, and the optimum asphalt content was determined by preparing three briquettes for each of the percentages: 5.00, 5.50, 6.00, 6.50, and 7.00 percent, resulting in an optimal content of 6.45 percent. Similarly, to establish the optimum percentage of fiberglass, the results obtained for percentages of 5.00, 7.50, 10.00, 15.00, and 25.00 percent were compared, with 5.00 percent yielding the best characteristics and properties.

Upon completing all phases of the research, it is concluded that fiberglass asphalt concrete exhibits 11.05 percent less stability than traditional asphalt concrete. However, all its other properties meet Marshall criteria, except for asphalt-filled voids, which exceed them by 5.50 percent.

CAPITULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes Investigativos

1.1.1. Antecedentes

En el mundo, se ha utilizado hormigón asfáltico convencional basado en diseños preestablecidos por ingenieros. Sin embargo, con el pasar del tiempo, se ha evidenciado un deterioro en las vías debido al flujo vehicular, condiciones climáticas, materiales y falta de mantenimiento adecuado. Por lo tanto, se ha reconocido la importancia de introducir nuevas técnicas y tecnologías, utilizando materiales innovadores que aporten mayor resistencia, durabilidad, reducción de costos y disminución del tiempo de mantenimiento. [1], [2]

Por lo cual, los materiales reciclados en el asfalto se han aplicado con el propósito de menorar los impactos ambientales y conservar los recursos naturales para las generaciones futuras. Con el fin de prolongar la vida útil y minimizar el desgaste en el pavimento flexible, es esencial que las capas de asfalto sean mejoradas en términos de su desempeño, resistencia a deformaciones permanentes, fatiga causada por cargas y procesos de envejecimiento. Dado que las afecciones causadas por el envejecimiento afectan el rendimiento de la carretera, es esencial llevar a cabo diversos proyectos de investigación con el propósito de mitigar los impactos de este proceso. Esto se hace con la intención de mejorar la comodidad y la seguridad al utilizar esta infraestructura. [3], [4]

A su vez, el uso de fibras sintéticas como las de origen natural desempeñan un papel fundamental al mejorar propiedades mecánicas de componentes estructurales, como la capacidad de resistencia a la tracción e impacto, las fibras aplicadas a hormigones asfálticos es una variable que ayuda al progreso tecnológico, ya que su uso mejora el comportamiento menorando las deformaciones y daños a los pavimentos, beneficiando

los periodos de diseños a los tradicionales. La incorporación de fibras de vidrio se ha empleado en varios países para la construcción y mantenimiento de vías. Esto se debe a la necesidad de lograr una mayor resistencia a las deformaciones y, en consecuencia, garantizar una superficie de rodadura uniforme. [5], [6]

En 2022, Carrillo [7] en su trabajo titulado “Estudio de Mezclas Asfálticas en Frío con fibras de vidrio”, define que la aplicación de fibras de vidrio en mezclas asfálticas en frío mejora las propiedades mecánicas del asfalto mejorando su durabilidad y permitiendo alargar su vida útil, permitiendo optimizar recursos. Mediante ensayos Marshall se evaluó estabilidad, densidad y flujo, obteniendo que el porcentaje de fibra de vidrio optimo es de 0.15%, logrando una estabilidad de 2650.95 lb, evidenciando que la fibra de vidrio no mejora la estabilidad, ya que la estabilidad de una mezcla asfáltica normal es 2707.33 lb, mientras que el flujo de una mezcla tradicional es de 14 y para la mezcla adicionada fibra de vidrio es de 17. Referente al costo el valor de la mezcla asfáltica añadiendo fibras de vidrio aumenta un 2.96% a una mezcla tradicional.

En 2016, Jimenez[8]propuso el trabajo titulado “Análisis comparativo de la estabilidad y la deformación del pavimento asfáltico con fibras celulosas y pavimento asfáltico tradicional”, describe la adición de fibras celulosas a la carpeta asfáltica, ya que, confiere importantes ventajas al pavimento en términos de resistencia a altas temperaturas, prolongando su vida útil gracias a una mejor unión e impermeabilidad. Dando como resultado, una reducción al riesgo de que se formen baches en las carreteras, lo que promueve un entorno propicio para el transporte, la mezcla se diseñó mediante el método Marshall, realizando briquetas con porcentajes de 5.00%, 5.50%, 6.00%, 6.50%, 7.00% de cemento asfáltico premezclado con 0.30% de fibras de coco, dando como resultado que el contenido óptimo de cemento asfaltico era de 6.76%. De los resultados obtenidos se puede evidenciar que el pavimento asfáltico con fibras es 3.10% más costoso que la mezcla asfáltica tradicional, la fibra de coco influyo

negativamente en la deformación, ya que causa una disminución en la capacidad de resistencia de la estructura del pavimento.

Hay que tener en cuenta que Quimbita [9] en su investigación “Evaluación del efecto de la adición de caucho vulcanizado triturado en mezclas asfálticas en frío”, el propósito principal de esta investigación es la incorporación de caucho vulcanizado triturado en mezclas de asfalto en frío. Se elaboraron tres muestras de prueba con adiciones de caucho del 0%, 3%, 6%, 9%, 12% y 15%. El agregado pétreo se obtuvo de la cantera de Herrera en la ciudad de Latacunga, y se aplicó el método Marshall para obtener parámetros esenciales que permitirán diseñar posteriormente una estructura de pavimento flexible, después de crear las muestras de prueba, se llevaron a cabo pruebas de estabilidad y flujo. Se concluyó que el contenido óptimo para las muestras sin caucho fue del 6.03%, mientras que para las muestras con caucho vulcanizado triturado al 3%, 6%, 9%, 12% y 15%, los porcentajes óptimos fueron de 6.2%, 6%, 6.13%, 6.03% y 5.9%, respectivamente. Esto indica que a medida que aumenta la proporción de caucho vulcanizado triturado, la estabilidad disminuye mientras que el flujo aumenta, manteniendo la elasticidad.

Por lo tanto, para la adición de diferentes materiales en mezclas asfálticas, se han aplicado diferentes metodologías entre estas el método Marshall, esto debido que los parámetros Marshall son de utilidad para gestionar el proceso de producción en planta de hormigones asfálticos, teniendo en cuenta la influencia de la granulometría: agregado grueso, agregado fino y filler, además de la temperatura a la cual se van a mezclar los áridos con la emulsión asfáltica, ya que estos inciden directamente al comportamiento del pavimento, el ensayo Marshall consiste en muestras cilíndricas con diámetros y espesores normados, donde se compacta el hormigón asfáltico a 72 golpes por lado con un martillo normado, dando como resultado a las briquetas, las cuales se exponen a un baño de agua con una temperatura de 60° Centígrados, los cuales son ensayados por un gato hidráulico con medidor de velocidad, hasta que la

muestra llegue al punto de rotura, el método proporciona información que garantiza la calidad de producción de hormigones asfálticos. [10], [11]

Además, para pavimentos flexibles las fibras son una buena opción, dado que en ensayos realizados: tracción indirecta, prueba de seguimiento de ruedas, Marshall, dan resultados positivos, en cuanto al porcentaje de fibra óptimo para mejorar las propiedades de los hormigones asfálticos estas varían según: tamaño, forma, tipo de fibra y como se añaden, ya que según el tipo de investigación se necesita cambiar el porcentaje del agregado grueso, agregado fino, filler y emulsión asfáltica. [12]

Por último, es importante mencionar que, en algunos casos, la mezcla con fibras puede requerir un mayor tiempo de fraguado, lo que podría causar retrasos en la apertura al tráfico, lo que debe considerarse en la planificación de proyectos de construcción de carreteras y pavimentos. Aunque estas mezclas ofrecen diversas ventajas, también presentan ciertas desventajas, tales como, una durabilidad funcional y estructural, Esto hace que los pavimentos drenantes sean susceptibles a la formación de baches debido a los efectos del tráfico y del entorno. [13]

1.2 Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Analizar el comportamiento del hormigón asfáltico mezclado con fibra de vidrio, utilizando el ensayo Marshall.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Definir la dosificación óptima de la mezcla asfáltica con aplicación de fibra de vidrio.
- Comparar las propiedades Marshall del hormigón asfáltico mezclado con fibra de vidrio frente al hormigón asfáltico tradicional.
- Establecer ventajas y desventajas de la utilización de hormigones asfálticos mezclados con fibras de vidrio frente al hormigón asfáltico tradicional.

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA.

La presente investigación se dividió en tres fases, a continuación, se va a describir materiales y métodos de acuerdo con estas fases.

2.1 Materiales

En el ensayo de granulometría los materiales y equipos utilizados fueron agregado de tamaño $\frac{3}{4}$ tipo C, tamices $\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ " No 4, 8, 50, y 200, fondo y tapa, tamizador mecánico, balanza electrónica, brocha, horno y bandejas metálicas.

En el ensayo de gravedad específica de agregados gruesos los materiales y equipos utilizados fueron agregados gruesos, balanza electrónica, canasta, tanque de agua, horno, franela y tamiz No 4

En el ensayo de gravedad específica de agregados finos los materiales y equipos utilizados fueron agregados finos, cono, apisonador, bandejas metálicas, balanza electrónica, tamiz No 4 y Picnómetro.

En el ensayo de abrasión o desgaste los materiales y equipos usados fueron agregado grueso, tamices $1\frac{1}{2}$ ", $1\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", No 4, 10, balanza electrónica, horno, esferas de acero y máquina de abrasión de los Ángeles.

Para la elaboración de briquetas se utilizó agregados gruesos, finos, filler, fibra de vidrio y cemento asfáltico, tamices $\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ " No 4, 8, 50, y 200, fondo y tapa, horno, molde de compactación de 4" de diámetro y 3" de altura con su collar de extensión, martillo de compactación con zapata circular, pedestal de compactación firmemente anclado al piso, extractor de probetas, termómetro digital.

Para la determinación del peso específico bulk se utilizó balanza electrónica, canasta, tanque de agua, baño maría y calibrador pie de rey.

Para el ensayo Marshall se requirió de un baño maría y la prensa para el ensayo Marshall.

Para el ensayo Rice se requirió de picnómetro de vacíos, bomba de vacíos, termómetro y recipientes.

2.2 Métodos

Se detallará el proceso para analizar comparativamente un hormigón asfáltico tradicional y un hormigón asfáltico con fibra de vidrio, utilizando el ensayo Marshall, para lo cual se siguieron las siguientes fases:

Fase 1

Se definió la dosificación óptima de la mezcla asfáltica con aplicación de fibra de vidrio, utilizando el ensayo Marshall, para lo cual se aplicó el método experimental.

Los ensayos requeridos para obtener la dosificación óptima fueron:

2.2.1 Granulometría de agregados

El procedimiento se llevó a cabo de acuerdo con las normativas ASTM C 136 y MTOP, los agregados se clasificaron en fracciones según su tamaño mediante tamices específicos. Es importante destacar que los agregados deben cumplir con los requisitos establecidos en las Especificaciones Generales para la Construcción de caminos y Puentes, tabla 405-5.1.

Gráfica 1. Ensayo de Granulometría



Fuente: Autor

Tabla 1. Porcentajes granulométricos

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	3/4"	1/2"	3/8"	N4
1"	100	--	--	--
3/4"	90-100	100	--	--
1/2"	--	90-100	100	--
3/8"	56-80	--	90-100	100
N4	35-65	44-74	55-85	80-100
N8	23-49	28-58	32-67	65-100
N16	--	--	--	40-80
N30	--	--	--	25-65
N50	5-19	5-21	7-23	7-40
N100	--	--	--	3-20
N200	2-8	2-10	2-10	2-10

Fuente: Tabla 405-5.1. MOP-001-F 2002, Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes. []

En la etapa inicial, se inicia el proceso de secado de una muestra de agregado fino mediante el horno, manteniendo una temperatura de 110 ± 10 grados durante un tiempo de 24 horas. Una vez que los agregados finos han alcanzado el estado seco, se procede a pesar con precisión 1200 gramos de agregado fino. Seguidamente, se lleva a cabo el tamizado utilizando los tamices de tamaños 1", 3/4", 3/8", No 4, 8, 50 y 200, empleando un tamizador mecánico durante 10 minutos. Posteriormente, se retiran los tamices del tamizador y se procede a pesar los agregados retenidos en cada tamiz. Los datos resultantes son tabulados para su posterior análisis y registro.

2.2.2 Gravedad específica de agregados finos

La prueba se llevó a cabo de acuerdo con la normativa INEN 856, con el objetivo de determinar la gravedad específica como la capacidad de absorción del agregado fino.

La muestra se selecciona por cuarteo, se mezcla íntegramente hasta obtener una muestra de 1000 g, rechazando lo que retiene el tamiz N#4, se deja secar la muestra al horno a 110 ± 5 °C, posteriormente, se deja enfriar la muestra hasta una temperatura manipulable, lavamos el material teniendo cuidado de no eliminar las partículas del agregado fino, sumergir la muestra en un recipiente y dejarlo reposar durante $24 \text{ hr} \pm 4\text{h}$.

Para conseguir el estado S.S.S. decantamos el exceso de agua, extraemos la muestra y tendemos en una bandeja, donde se deja secar, se coloca el cono con el diámetro mayor hacia abajo, colocamos la muestra hasta llenar el molde y acumulamos material adicional en la parte superior del cono, se apisona con 25 caídas del pistón metálico, cada caída debe ser alrededor de 5mm sobre la parte superior, retiramos el molde verticalmente. Cuando el agregado se disgregue levemente, se obtiene la condición saturada superficialmente seca.

Para el procedimiento de ensayo de picnómetro, se introduce aproximadamente 500 ± 10 g de agregado en estado saturado superficialmente seco en el picnómetro, que se llena posteriormente hasta aproximadamente el 90% de su capacidad con agua. Luego, se realiza un proceso de eliminación de burbujas de aire al role, invertir y agitar manualmente el picnómetro, seguido de un llenado adicional hasta la marca de calibración. La temperatura se ajusta a 23 ± 2 °C si es necesario. Se determina la masa total del picnómetro, espécimen y agua con una precisión de 0.1 g. Posteriormente, se remueve el agregado fino, se seca a masa constante a 110 ± 5 °C, y se determina su masa. Además, se determina la masa del picnómetro lleno hasta la capacidad de

calibración con agua a $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Finalmente, se llevan a cabo los cálculos pertinentes para analizar los resultados obtenidos en el ensayo.

Gráfica 2. Extracción de aire del picnómetro



Fuente: Autor

Gravedad específica

$$Gsh = \frac{A}{B + A - C}$$

(E.c. 1)

Absorción

$$\%Ab = \frac{D - A}{A} * 100$$

(E.c. 2)

Donde:

A = masa en aire de la muestra seca al horno

B = masa del picnómetro lleno de agua

C = masa del picnómetro calibrado con el agregado y agua hasta la marca

D = masa del material en estado saturado superficialmente seco

2.2.3 Gravedad específica de agregados gruesos

El ensayo se realizó según la norma NTE INEN 857, para determinar: la gravedad específica y la absorción del árido grueso.

La masa mínima de la muestra para realizar el ensayo se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 2. Masa mínima de la muestra de ensayo

Tamaño máximo nominal		Masa mínima de la muestra de prueba
Pulg	mm	kg
1/2	12,5	2
3/4	19	3
1	25	4
1 1/2	37,5	5
2	50	8
2 1/2	63	12
3	75	18
3 1/2	90	25
4	100	40

Fuente: NTE INEN 857, Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso. []

La muestra primero debe ser lavada y secada, posteriormente se sumerge el árido en agua a temperatura ambiente por 24 hr \pm 4h, luego de transcurrido el periodo de tiempo descrito se retira el agregado y se lo seca superficialmente, determinamos su masa en condición saturada superficialmente seca, luego se determina los volúmenes de muestra en aire y agua con ayuda de la canastilla la cual previamente debe ser pesada,

secamos la muestra de ensayo a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta conseguir una masa constante, y se determina su masa seca.

Gráfica 3. Remojo de los agregados gruesos



Fuente: Autor

Gravedad específica

$$G_{sh} = \frac{A}{A - C}$$

(E.c. 3)

Absorción

$$\%Ab = \frac{B - A}{A} * 100$$

(E.c. 4)

Donde:

A = masa en aire de la muestra seca al horno

B = masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca

C = masa aparente en agua de la muestra saturada

Gravedad específica de la combinación de agregados

Para calcular la gravedad específica de los agregados finos y gruesos se ocupa la fórmula:

$$G = \frac{P1 + P2 + \dots + Pn}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \dots + \frac{Pn}{Gn}}$$

(E.c. 5)

Donde:

G = gravedad específica promedio

G1, G2,...,Gn = valores de gravedad específica por agregado

P1, P2,...,Pn = % peso por agregado

2.2.4 Abrasión o desgaste del agregado grueso

El ensayo de abrasión o desgaste se basó según la norma INEN 860 y ASTM C131, se evaluó la resistencia de un material a la abrasión, es decir la pérdida de material causada por fricción contra superficies abrasivas, esta deberá ser menor al 40% de desgaste.

Para se procede a lavar minuciosamente los agregados gruesos y se les deja secar en el horno a una temperatura de 110 ± 10 grados durante 24 horas. Posteriormente, se pesa una muestra precisa de 5000 ± 10 gramos según las especificaciones para el ensayo de abrasión.

Gráfica 4. Ensayo de abrasión



Fuente: Autor

Tabla 3. Especificaciones para el ensayo de abrasión

Tamaño de las aberturas de tamiz (mm) (aberturas cuadradas)		Masa por tamaños indicada (gr)			
Pasante de	Retenido en	Gradación			
		A	B	C	D
37,5	25	1250 ± 25			
25	19	1250 ± 25			
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10		
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10		
9,5	6,3			2500 ± 25	
6,3	4,75			2500 ± 25	
4,75	2,36				5000 ± 10
Total		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10
Número de esferas		12	11	8	6
Número de revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de Rotación (minutos)		15	15	15	15

Fuente: ASTM C-131, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. []

Acto seguido, la muestra pesada se pone en la máquina de abrasión de los Ángeles, se introducen las esferas correspondientes, y la máquina se hace girar 500 revoluciones en un lapso de 15 minutos. Una vez completado este ciclo, se retira el material de la máquina y se procede a tamizarlo utilizando el tamiz No 10. Finalmente, se lleva a cabo la determinación del porcentaje de desgaste, concluyendo así el proceso de evaluación de los agregados.

$$\%Desg = \left(\frac{A - B}{A} \right) * 100$$

(E.c. 6)

Donde:

A = masa de la muestra antes de ensayar

B = masa retenida tamiz No 10

2.2.5 Dosificación de las briquetas

Para la dosificación de las briquetas se utilizaron las especificaciones de gradación de agregados dados por la norma ASTM D 3515, se empleó cinco porcentajes diferentes de cemento asfáltico, comenzando desde 5% de cemento asfáltico con incrementos de 0.5%, teniendo así: 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7%.

2.2.6 Elaboración de briquetas

Para la preparación de las briquetas, se inicia tamizando y pesando las cantidades necesarias, cada briqueta debe pesar 1200 gramos, se procede a calentar la mezcla de agregados finos y gruesos, así como el cemento asfáltico, manteniéndolos entre 140°C y 150°C. Con ambos componentes listos, se realiza una mezcla rápida a la mencionada temperatura para lograr una cobertura completa y homogénea de todas las partículas.

Gráfica 5. Preparación de los materiales para la mezcla asfáltica



Fuente: Autor

Previamente a la preparación, se calientan en el horno: placa base, collar, molde y bandeja a la misma temperatura. Acto seguido, la mezcla asfáltica en caliente se introduce en el molde, aplicando 25 pinchazos estratégicos (15 alrededor y 10 al azar). El molde se coloca en el pedestal donde se compactará, con 75 golpes de caída libre,

es crucial mantener el tallo del pistón siempre vertical, se invierte el molde y se aplican otros 75 golpes. Una vez completado el proceso de compactación, se retira el molde, se desmonta y se deja enfriar la briqueta a temperatura ambiente durante 2 horas.

Gráfica 6. Compactación de la muestra



Luego, se coloca un collar de extensión en el molde, extrayendo la probeta compactada, la cual se identifica con crayones.

Fuente: Autor

2.2.7 Ensayo Marshall

En el proceso de prueba Marshall, cada muestra compactada se enfrenta a los siguientes ensayos en la secuencia especificada:

- Determinación del peso específico “bulk”
- Ensayo de estabilidad y flujo
- Análisis de la densidad y vacíos.

Previamente se identifica el número de muestra, se mide los pesos y espesores de cada briqueta en centímetros.

2.2.7.1 Determinación del peso específico “bulk”

Determina la gravedad específica de la mezcla asfáltica, teniendo en cuenta el peso de la briqueta obtenida en seco en aire, sumergido en agua y S.S.S en aire.

Las briquetas se ambientan en baño maría a una temperatura de 25 °C por cinco minutos, se pesan en agua mediante una canastilla y por último se seca la briqueta y se toma el valor de la condición saturada superficialmente seca.

Gráfica 7. Baño María de las briquetas a 25 °C



Fuente: Autor

$$G = \frac{D}{E - F}$$

(E.c. 7)

Donde:

G = gravedad específica bulk

D = masa seca en aire

E = masa saturado superficie seca

F = masa sumergida en agua

2.2.7.2 Peso específico máximo teórico

Este valor representa la masa que se obtendría al comprimir la muestra hasta alcanzar un estado sin vacíos de aire, tanto de la fracción de asfalto como en la de los áridos.

$$H = \frac{100}{\frac{\%Agreg}{Gagr} + \frac{\%CA}{Gasf}}$$

(E.c. 8)

Donde:

H = peso específico máximo teórico

%Agreg = % agregado seco

%CA = % cemento asfáltico

Gagr = gravedad específica del agregado

Gasf = gravedad específica del asfalto

2.2.7.3 Análisis de densidad y vacíos

El ensayo de densidad y vacíos se basó según la norma ASTM D 2041, Se obtiene utilizando el método James Rice, y su importancia radica en la necesidad de obtener el porcentaje de cemento asfáltico absorbido por los agregados, así como el volumen real de los vacíos llenos de aire presentes cuando la muestra esta compactada.

El ensayo implica tomar una muestra de la mezcla asfáltica, segregarla sin fracturar las partículas y pesar dos picnómetros: uno con el molde con agua a 25 °C y otro con la muestra con agua a 25 °C. La muestra se coloca en el picnómetro de vacíos, se llena con agua a 25 °C, se agita manualmente y se somete a extracción de burbujas de aire con una bomba de vacío. Finalmente, se llena el picnómetro de vacíos con agua, conservando burbujas, y se registra el peso total.

Gráfica 8. Ensayo Rice



Fuente: Autor

2.2.7.4 Porcentaje de asfalto absorbido por peso del agregado seco

Se calcula mediante la siguiente formula:

$$J = \frac{(I - H) * 10^4}{I * H * \%Agreg}$$

(E.c. 9)

Donde:

J = % asfalto absorbido

I = Valor ensayo Rice

H = gravedad especifica teórica

%Agreg = % agregado seco

2.2.7.5 Porcentaje en volumen del agregado con respecto al volumen total

$$K = \frac{\%Agreg * G}{Gagr}$$

(E.c. 10)

Donde:

K = % volumen del agregado

G = gravedad específica bulk

%Agreg = % agregado seco

Gagr = gravedad específica del agregado

2.2.7.6 Porcentaje de vacíos con aire respecto al volumen total

$$L = \left(1 - \frac{G}{I}\right) * 100$$

(E.c. 11)

Donde:

L = % vacíos con aire

G = gravedad específica bulk

I = Valor ensayo Rice

2.2.7.7 Volumen de asfalto efectivo como porcentaje de volumen total

$$M = 100 - K - L$$

(E.c. 12)

Donde:

M = % volumen de asfalto efectivo

L = % vacíos con aire

K = % volumen del agregado

2.2.7.8 Porcentaje de vacíos que contienen los agregados de la mezcla

$$N = 100 - K$$

(E.c. 13)

Donde:

N = % vacíos de agregados

K = % volumen del agregado

2.2.7.9 Contenido de asfalto efectivo con respecto al peso de la mezcla

$$O = \%CA - \frac{J * \%Agreg}{100}$$

(E.c. 14)

Donde:

O = asfalto efectivo con respecto al peso de la mezcla

%CA = % cemento asfáltico

J = % asfalto absorbido

%Agreg = % agregado seco

2.2.7.10 Porcentaje de vacíos llenos de asfalto

$$P = \frac{N - L}{N} * 100$$

(E.c. 15)

Donde:

P = % vacíos llenos de asfalto

N= % vacíos de agregados

L = % vacíos con aire

2.2.7.11 Ensayo de estabilidad y flujo

La estabilidad Marshall es un indicador crucial de la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir deformaciones, mientras que el valor del flujo evalúa la resistencia al asentamiento de la mezcla asfáltica, la determinación de estos valores se realiza a través de la prensa Marshall.

Antes de realizar al ensayo en la maquina Marshall es necesario sumergir las briquetas en baño maría a una temperatura de 60°C por 30 minutos, se coloca la briqueta se posicionan en la mordaza de manera centrada, y se aplica una carga continua hasta que la briqueta falle, finalmente, se tabulan los datos.

Gráfica 9. Ensayo de Estabilidad y Flujo



Fuente: Autor

2.2.7.12 Corrección de estabilidad por altura

Registramos el factor de corrección, rectificamos los valores de estabilidad de cada probeta

$$S = Q * R$$

(E.c. 16)

Donde:

S = corrección de estabilidad por altura

Q = factor de corrección por espesor

R = valor de estabilidad en libras

Tabla 4. Factores de corrección de la estabilidad

Volumen de la muestra en cm ³	Espesor aproximado muestra en mm	Factor de corrección	Volumen de la muestra en cm ³	Espesor aproximado muestra en mm	Factor de corrección
200-213	25,4	5,56	406-420	50,8	1,47
214-225	26,9	5,00	421-431	52,4	1,39
226-237	28,6	4,55	432-443	54,0	1,32
238-250	30,2	4,17	444-456	55,6	1,25
251-264	31,8	3,85	457-470	57,2	1,19
265-276	33,3	3,57	471-482	58,7	1,14
277-289	34,9	3,33	483-495	60,3	1,09
290-301	36,5	3,03	496-508	61,9	1,04
302-316	38,1	2,78	509-522	63,5	1,00
317-328	39,7	2,50	523-535	65,1	0,93
329-340	41,3	2,27	536-546	66,7	0,93
341-353	42,9	2,08	547-559	68,3	0,89
354-367	44,5	1,92	560-573	69,9	0,86
368-379	46,0	1,79	574-585	71,5	0,83
380-392	47,6	1,67	586-598	73,0	0,81
393-405	49,2	1,56	599-610	74,6	0,78
			611-625	76,2	0,76

Fuente: ASTM T 245-79

2.2.8 Determinación de contenido óptimo de cemento asfáltico

Se generan seis gráficos distintos, para representar las siguientes relaciones:

- Peso específico bulk vs % cemento asfáltico
- Índice de vacíos con aire vs % cemento asfáltico
- Vacíos de agregados vs % % cemento asfáltico
- Estabilidad vs % cemento asfáltico
- Flujo vs % cemento asfáltico
- % vacíos llenos de asfalto vs % cemento asfáltico

Para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico, se consideran tres curvas de los gráficos presentados:

- % cemento asfáltico para la máxima densidad o peso específico
- % cemento asfáltico que corresponde al 4% del índice de vacíos
- % cemento asfáltico que corresponde a la máxima estabilidad

El valor óptimo se obtiene calculando el promedio de estos tres valores, los cuales deben cumplir con las especificaciones establecidas.

Tabla 5. Criterios de diseño para mezclas Marshall.

Criterio de mezcla	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado		Muy pesado	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Número de golpes en cada cara de la probeta	35		50		75		75	
Estabilidad en libras	750		1200		1800		2200	
Flujo en centesimas de pulgada	8	18	8	16	8	16	8	14
Porcentaje de vacios	3	5	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacios rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75	65	75
Porcentaje de vacios en agregados minerales	Ver tabla							

Fuente: Tabla 405-5.2. MOP-001-F 2002, Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes.

2.2.9 Dosificación de la fibra de vidrio

Para el diseño de las briquetas con fibra de vidrio, se dosifico de manera que el peso de la fibra sea 5%, 7.5% 10%, 15% y 25% del porcentaje de agregado que retiene el tamiz 200.

Para la realización de las briquetas con fibra de vidrio se usó el porcentaje óptimo del hormigón asfáltico tradicional, calculada mediante metodología Marshall.

2.2.10 Elaboración de briquetas (mezcla asfáltica con fibras de vidrio)

La preparación de las briquetas con fibras de vidrio comienza desmembrando la fibra de vidrio y pesando los agregados con las cantidades, se mezclan los agregados con la fibra de vidrio, la cantidad de cemento asfáltico será el óptimo que se determinó con metodología Marshall de las briquetas tradicionales, cada biqueta debe pesar 1200 gramos, se procede a calentar la mezcla de agregados finos, agregados gruesos, filler y la fibra de vidrio, así como el cemento asfáltico, manteniéndolos entre 140°C y 150°C. Con ambos componentes listos, se realiza una mezcla rápida a la mencionada temperatura para lograr una cobertura completa y homogénea de todas las partículas. Previamente a la preparación, se calientan en el horno la bandeja, el collar, el molde, la placa base y las espátulas a la misma temperatura. Acto seguido, la mezcla asfáltica en caliente se introduce en el molde, aplicando 25 pinchazos estratégicos (15 alrededor y 10 al azar). El molde se coloca en el pedestal de compactación, donde la zapata del pistón se apoya sobre la mezcla para recibir 75 golpes de caída libre, es crucial mantener el tallo del pistón siempre vertical, se invierte el molde y se aplican otros 75 golpes. Una vez completado el proceso de compactación, se retira el molde, se desmonta y se deja enfriar la biqueta a temperatura ambiente durante 2 horas. Luego, se coloca un collar de extensión en el molde, extrayendo la probeta compactada, la cual se identifica con crayones.

Gráfica 10. Mezcla de agregados con fibra de vidrio



Fuente: Autor

2.2.11 Ensayo Marshall para las briquetas (mezcla asfáltica con fibras de vidrio)

Las briquetas (mezcla asfáltica con fibra de vidrio) se sometieron a los mismos ensayos establecidos en **2.2.7. Ensayo Marshall.**

Fase 2

Se analizó comparativamente las propiedades Marshall de un hormigón asfáltico tradicional frente a un hormigón asfáltico con fibra de vidrio, para esto se aplicó el método cuantitativo.

Tras realizar los ensayos de las briquetas según la metodología Marshall, se procedió al análisis de las características obtenidas. Se realizó una comparación exhaustiva de los valores de estabilidad, flujo, vacíos con aire, vacíos en agregados minerales, vacíos rellenos de asfalto entre el hormigón asfáltico tradicional y el hormigón asfáltico mezclado con fibra de vidrio. Este análisis se amplió para evaluar la resistencia a la deformación de ambas mezclas, explorando cómo la incorporación de fibra de vidrio impacta directamente en la capacidad de carga. Para facilitar la interpretación de los resultados, se emplearon gráficos y tablas comparativas que resaltarán de manera visual las diferencias significativas entre las propiedades de ambas mezclas,

proporcionando así una comprensión detallada de los efectos de la fibra de vidrio en las características mecánicas y de rendimiento del hormigón asfáltico.

Fase 3

Se estableció ventajas y desventajas de la utilización de hormigones asfálticos mezclados con fibras de vidrio frente al hormigón asfáltico tradicional, en el cual se aplicó el método cuantitativo.

Se revisaron las especificaciones y criterios Marshall para ambas mezclas, el hormigón asfáltico con fibra de vidrio y el hormigón asfáltico tradicional, mediante un análisis teórico y comparativo que incluye tablas. Se analizó los beneficios y limitaciones de cada mezcla, destacando sus fortalezas y áreas de mejora.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión de los resultados.

En el presente capítulo, se presentan en detalle los datos obtenidos del análisis comparativo de un hormigón asfáltico tradicional y un hormigón asfáltico con fibra de vidrio, realizado mediante el ensayo Marshall, El estudio abarca tres fases para facilitar la comprensión de las propiedades de ambas mezclas. Se incluyen resultados específicos relacionados con la estabilidad, flujo, vacíos con aire, vacíos con agregados minerales y vacíos rellenos de asfalto, obtenidos mediante la metodología Marshall:

Fase 1



Se definió la dosificación óptima del hormigón asfáltico con aplicación de fibra de vidrio, mediante diferentes ensayos realizados:

Fuente de los agregados

Para llevar a cabo el Proyecto, se procedió a la recolección de muestras de los agregados provenientes de la Cantera Salvador, la cual se encuentra ubicada en la vía aguajan, en el cantón Ambato.

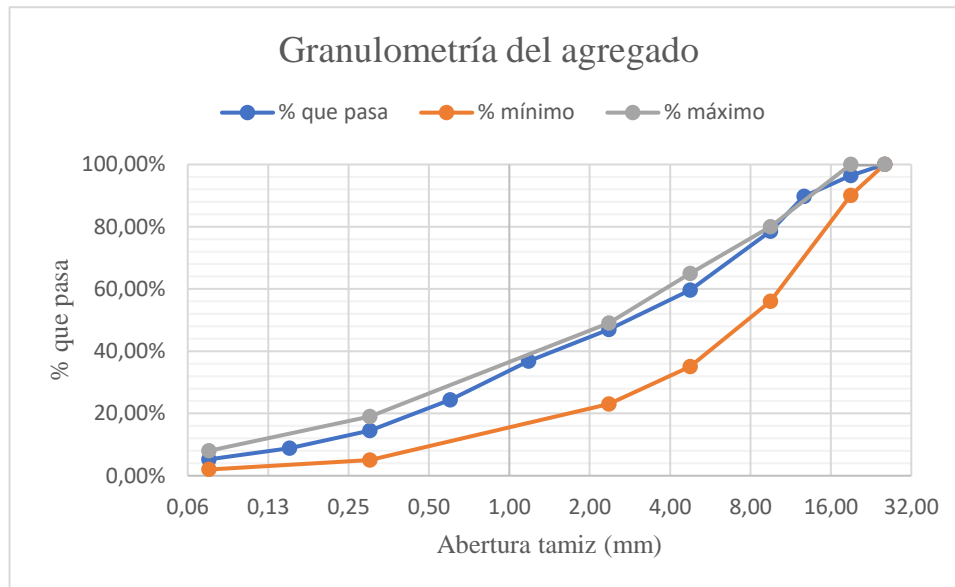
3.1.1 Granulometría de los agregados

Tabla 6. Granulometría de los agregados

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO MEZCLADO CON FIBRA DE VIDRIO, UTILIZANDO EL ENSAYO MARSHALL							
Origen:	Cantera Salvador						
Peso muestra (gr):	1200 gr						
Realizado por:	Erick Nicolás Bonilla Bravo			Fecha:	12/09/2023		
Norma:	MOP-001-F 2002						
Sitio:	Laboratorio FICM - UTA						
Determinación de la granulometría del agregado							
Tamices		Retenido Parcial (gr)	Retenido Acumulado (gr)	% Retenido Acumulado	% que pasa	Límite MOP-001-F 2002	
N#	mm						
1"	25,4	0,00	0,00	0,00%	100,00%	100	
3/4"	19	42,32	42,32	3,53%	96,47%	90-100	
1/2"	12,7	80,56	122,88	6,71%	89,76%	..	
3/8"	9,5	135,24	258,12	11,27%	78,49%	56-80	
#4	4,75	225,86	483,98	18,82%	59,67%	35-65	
#8	2,36	152,33	636,31	12,69%	46,97%	23-49	
#16	1,18	122,56	758,87	10,21%	36,76%	..	
#30	0,6	148,94	907,81	12,41%	24,35%	..	
#50	0,3	118,20	1026,01	9,85%	14,50%	5-19	
#100	0,15	67,46	1093,47	5,62%	8,88%	..	
#200	0,075	43,42	1136,89	3,62%	5,26%	2-8	
Filler		63,11	1200,00	5,26%	0,00%		
TOTAL		1200					

Fuente: Autor

Gráfica 11. Curva granulométrica del agregado



Fuente: Autor

Los agregados finos y gruesos cumplen con los porcentajes máximos y mínimos de las especificaciones del MOP-001-F 2002 para agregados de $\frac{3}{4}$, por lo cual se tiene una granulometría adecuada para la elaboración de briquetas.

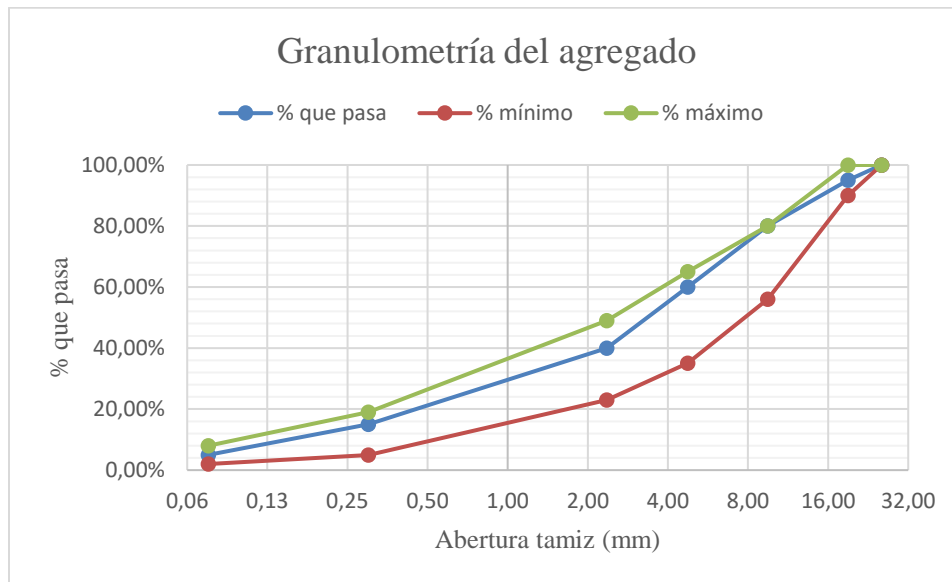
3.1.2 Dosificación propuesta

Tabla 7. Mezcla propuesta

Agregado	Tamices	Especificación (3/4)	Pasa	Retiene %	% Peso de cada agregado
Grueso	1"	100	100	0	40,00%
	3/4	90-100	95	5	
	3/8	56-80	80	15	
	No.4	35-65	60	20	
Fino	No.8	23-49	40	20	55,00%
	No.50	5-19	15	25	
	No.200	2-8	5	10	
FILLER			0	5	5,00%
Total				100	100,00%

Fuente: Autor

Gráfica 12. Curva granulométrica de la mezcla propuesta



Fuente: Autor

Para la dosificación propuesta se menoró el porcentaje de agregado grueso, por consecuente se aumentó el porcentaje de agregados finos, esto con el fin de menorar el índice de vacíos de la mezcla asfáltica, la dosificación propuesta se realizó cumpliendo las especificaciones del MOP-001-F 2002 para agregados de ¾.

3.1.3 Gravedad específica de agregados finos

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO MEZCLADO CON FIBRA DE VIDRIO, UTILIZANDO EL ENSAYO MARSHALL			
Origen:	Cantera Salvador		
Realizado por:	Erick Nicolás Bonilla Bravo	Fecha:	12/09/2023
Norma:	NTE INEN 856		
Sitio:	Laboratorio FICM - UTA		
Determinación de la gravedad específica del agregado fino			
Proceso	Denominación	Unidad	Datos
Masa picnómetro	x_1	gr	172,60
Masal picnómetro + agregado (sss)	x_2	gr	675,12
Masa picnómetro + agregado (sss) + agua	x_3	gr	974,07
Masa agua añadida	$x_4 = x_3 - x_2$	gr	298,95
Masa picnómetro + 500cc de agua	x_5	gr	667,10
Masa 500cc de agua	$x_6 = x_5 - x_1$	gr	494,50
Temperatura agua	x_7	gr	23,00
Factor de corrección	x_8	Da	1,00
Masa agua desalojada por la muestra	$x_9 = x_6 - x_4$	gr	204,23
Masa agregado	$x_{10} = x_2 - x_1$	gr	500,02
Volumen agua desalojada	x_9/Da	gr	204,23
Masa agregado después de 24 hrs en el horno	x_{11}	gr	485,96
Gravedad específica del agregado fino	G_{esp}	gr/cm ³	2,72
Capacidad de absorción	$Ca = ((x_{10} - x_{11})/x_{11}) * 100$	%	2,89

Tabla 8. Gravedad específica de agregados finos

Fuente: Autor

3.1.4 Gravedad específica de agregados gruesos



Tabla 9. Gravedad específica del agregado grueso

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO MEZCLADO CON FIBRA DE VIDRIO, UTILIZANDO EL ENSAYO MARSHALL			
Origen:	Cantera Salvador		
Realizado por:	Erick Nicolás Bonilla Bravo	Fecha:	12/09/2023
Norma:	NTE INEN 857		
Sitio:	Laboratorio FICM - UTA		
Determinación de la gravedad específica del agregado grueso			
Proceso	Denominación	Unidad	Datos
Masa canastilla en el aire	x_1	gr	1302,50
Masa canastilla en el agua	x_2	gr	1146,00
Masa agregado S.S.S en aire	$x_3 = x_4 - x_1$	gr	3242,00
Masa canastilla + agregado S.S.S en el aire	x_4	gr	4544,50
Masa canastilla + agregado S.S.S en el agua	x_5	gr	3452,00
Masa agregado S.S.S en agua	$x_6 = x_5 - x_2$	gr	2306,00
Densidad real del agua	D	gr/cm ³	0,997
Masa agregado despues de 24hrs en el horno	x_7	gr	3170,02
Volumen agregado	$V = (x_5 - x_6) / D$	cm ³	1149,45
Densidad agregado grueso	$Dr = x_3 / V$	gr/cm ³	2,82
Capacidad de absorción	$CA = ((x_3 - x_7) / x_7) * 100$	%	2,27

Fuente: Autor

3.1.5 Gravedad específica resumida de los agregados

Tabla 10. Resumen de gravedades específicas de los agregados

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 		
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO MEZCLADO CON FIBRA DE VIDRIO, UTILIZANDO EL ENSAYO MARSHALL		
Origen:	Cantera Salvador	
Realizado por:	Erick Nicolás Bonilla Bravo	
Resumen de gravedades específicas de los agregados		
Agregado	Gravedad específica	Capacidad de absorción
Grueso	2,82%	2,27%
Fino	2,69%	2,89%

Fuente: Autor

La tabla nos resume las gravedades específicas y la capacidad de absorción de los agregados los cuales son necesarios para los cálculos de diseño de mezclas asfálticas.

Gravedad específica de la combinación de agregados

Para calcular la gravedad específica de los agregados finos y gruesos se ocupa la formula:

$$G = \frac{P1 + P2 + \dots + Pn}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \dots + \frac{Pn}{Gn}}$$

Donde:

G = gravedad específica promedio

G_1, G_2, \dots, G_n = valores de gravedad específica por agregado



P_1, P_2, \dots, P_n = porcentaje de peso por agregado

$$G = \frac{60 + 40}{\frac{60}{2.72} + \frac{40}{2.82}}$$

$$G = 2.759$$

3.1.6 Abrasión o desgaste del agregado grueso

Tabla 11. Desgaste del agregado grueso

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO MEZCLADO CON FIBRA DE VIDRIO, UTILIZANDO EL ENSAYO MARSHALL			
Origen:	Cantera Salvador		
Peso muestra (gr):	5000 gr		
Realizado por:	Erick Nicolás Bonilla Bravo	Fecha:	18/10/2023
Norma:	NTE INEN 860		
Sitio:	Laboratorio FICM - UTA		
Determinación del desgaste del agregado grueso por medio de la Máquina de los Ángeles			
Proceso	Denominación	Unidad	Datos
Masa total	A	gr	5000,00
Masa desgastada	B	gr	3099,12
Masa perdida por desgaste	$C = A - B$	gr	1900,88
Desgaste del agregado	$D = (C/A) * 100$	%	38,02

Fuente: Autor

El desgaste del agregado es menor al 40%, por lo tanto, cumple con lo especificado en la norma NTE INEN 860, por lo cual se puede trabajar con el agregado de la cantera.

3.1.7 Diseño Marshall de la mezcla asfáltica tradicional

3.1.7.1 Peso Específico “bulk”

$$G = \frac{D}{E - F}$$

Donde:

G = gravedad específica bulk

D = masa seca en aire

E = masa saturado superficie seca

F = masa sumergida en agua

$$G = \frac{1175.30}{1182.30 - 642.90}$$

$$G = 2.179$$

3.1.7.2 Peso específico máximo teórico

$$H = \frac{100}{\frac{\%Agreg}{G_{agr}} + \frac{\%CA}{G_{asf}}}$$

Donde:

H = peso específico máximo teórico

%Agreg = % agregado seco

%CA = % cemento asfáltico

Gagr = % agregado



Gasf = gravedad específica del asfalto

$$H = \frac{100}{\frac{95\%}{2.759} + \frac{5\%}{0.87}}$$

$$H = 2.489$$

3.1.7.3 Determinación de Rice

Tabla 12. Densidad Rice

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL							
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO MEZCLADO CON FIBRA DE VIDRIO, UTILIZANDO EL ENSAYO MARSHALL							
Origen:	Cantera Salvador						
Realizado por:	Erick Nicolás Bonilla Bravo	Fecha:	15/11/2023				
Norma:	ASTM D 2041						
Sitio:	Laboratorio FICM - UTA						
Determinación de Rice							
Proceso	Denominación	Unidad	% de Asfalto				
			5,00%	5,50%	6,00%	6,50%	7,00%
Peso de la muestra	A	gr	1464,00	1489,50	1474,12	1491,38	1485,64
Peso frasco + agua 25°C + muestra	B	gr	16668,30	16678,80	16665,46	16670,28	16661,31
Peso frasco + agua 25°C	C	gr	15791,50	15791,50	15791,50	15791,50	15791,50
Densidad Rice gr/cc	D = A/(A-(B-C))		2,493	2,473	2,456	2,435	2,412

Fuente: Autor

3.1.7.4 Porcentaje de asfalto absorbido por peso del agregado seco

$$J = \frac{(I - H) * 10^4}{I * H * \%Agreg}$$

Donde:

J = % asfalto absorbido

I = Valor ensayo Rice

H = gravedad especifica teórica

%Agreg = % agregado seco

$$J = \frac{(2.493 - 2.489) * 10^4}{2.493 * 2.489 * 95}$$

$$J = 0.071$$

3.1.7.5 Porcentaje en volumen del agregado con respecto al volumen total

$$K = \frac{\%Agreg * G}{Gagr}$$

Donde:

K = % volumen del agregado

G = gravedad específica bulk

%Agreg = % agregado seco

Gagr = gravedad específica del agregado

$$K = \frac{95 * 2.203}{2.759}$$

$$K = 75.539$$

3.1.7.6 Porcentaje de vacíos con aire respecto al volumen total

$$L = \left(1 - \frac{G}{I}\right) * 100$$

Donde:

L = % vacíos con aire

G = gravedad específica bulk

I = Valor ensayo Rice

$$L = \left(1 - \frac{2.203}{2.493}\right) * 100$$

$$L = 11.650$$

3.1.7.7 Volumen de asfalto efectivo como porcentaje de volumen total

$$M = 100 - K - L$$

Donde:

M = % volumen de asfalto efectivo

L = % vacíos con aire

K = % volumen del agregado

$$M = 100 - 75.539 - 11.650$$

$$M = 12.811$$

3.1.7.8 Porcentaje de vacíos que contienen los agregados de la mezcla

$$N = 100 - K$$

Donde:

N = % vacíos de agregados

K = % volumen del agregado

$$N = 100 - 75.539$$

$$N = 24.461$$

3.1.7.9 Contenido de asfalto efectivo con respecto al peso de la mezcla

$$O = \%CA - \frac{J * \%Agreg}{100}$$

Donde:

O = asfalto efectivo con respecto al peso de la mezcla

%CA = % cemento asfáltico

J = % asfalto absorbido

%Agreg = % agregado seco

$$O = 5\% - \frac{0.071 * 95\%}{100}$$

$$O = 4.932$$

3.1.7.10 Porcentaje de vacíos llenos de asfalto

$$P = \frac{N - L}{N} * 100$$

Donde:

P = % vacíos llenos de asfalto

N = % vacíos de agregados

L = % vacíos con aire

$$P = \frac{24.461 - 11.650}{24.461} * 100$$

$$P = 52.373$$

3.1.7.11 Corrección de estabilidad por altura

$$S = Q * R$$

Donde:

S = corrección de estabilidad por altura

Q = factor de corrección por espesor

R = valor de estabilidad en libras

$$S = 5073.71 * 0.7913$$

$$S = 4014.57$$

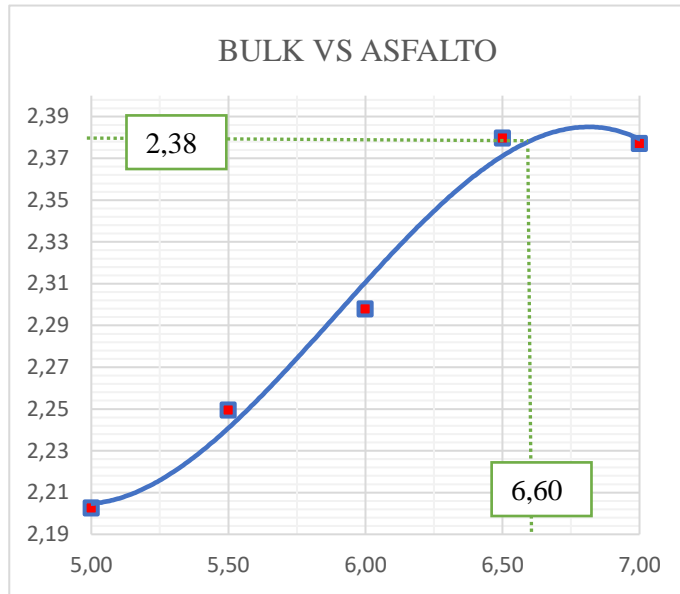
Tabla 13. Ensayo Marshall para briquetas de mezcla asfáltica tradicional

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO MEZCLADO CON FIBRA DE VIDRIO, UTILIZANDO EL ENSAYO MARSHALL																			
Realizado por: Erick Nicolás Bonilla Bravo										Fecha: 12/09/2023									
Diseño de la mezcla asfáltica por el método Marshall																			
Peso específico de los agregados:			2,759	gr/cm3				Peso específico del asfalto:			0,87	gr/cm3							
Muestra No.	Cemento Asfáltico%	Espesor Probeta (cm)	Peso en gramos			Peso Específico (gr/cm3)			Asfalto Absorbido %	Volumen -%Total			Vacíos en agregados minerales	% de asfalto efectivo	%vacíos llenos de asfalto	Estabilidad en libras			Flujo pulg/100
			Seca en aire	SSS en aire	En agua	Bulk (Gb)	Máximo Teórico	Máximo Medido		Agregado	Vacíos con Aire	Asfalto efectivo				Lectura dial	Factores corrección	Estabilidad Corregida	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1.1	5,00	7,40	1175,30	1182,30	642,90	2,179										5073,71	0,7913	4014,57	10,31
1.2		7,24	1191,00	1199,80	673,30	2,262										4039,82	0,8180	3304,57	12,00
1.3		7,20	1186,70	1195,90	648,20	2,167										4258,33	0,8233	3506,03	11,53
PROMEDIO						2,203	2,489	2,493	0,071	75,841	11,650	12,510	24,159	4,932	51,779			3405,30	11,28
2.1	5,50	7,40	1195,90	1203,50	670,60	2,244										5150,37	0,7913	4075,23	13,74
2.2		7,27	1187,90	1194,80	667,90	2,255										4341,73	0,8140	3534,17	12,81
2.3		7,30	1190,20	1198,40	669,30	2,249										4516,19	0,8100	3658,11	13,37
PROMEDIO						2,249	2,465	2,473	0,145	77,045	9,043	13,913	22,955	5,363	60,608			3755,84	13,31
3.1	6,00	7,30	1187,30	1195,60	675,00	2,281										5418,57	0,8100	4389,04	13,59
3.2		7,10	1171,90	1178,20	672,20	2,316										4547,88	0,8394	3817,38	13,30
3.3		7,10	1192,10	1201,40	682,40	2,297										5349,55	0,8394	4490,28	13,46
PROMEDIO						2,298	2,441	2,456	0,266	78,289	6,439	15,272	21,711	5,750	70,342			4439,66	13,45
4.1	6,50	7,10	1185,80	1195,20	699,30	2,391										5353,37	0,8394	4493,48	12,80
4.2		7,36	1195,10	1202,10	699,60	2,378										5655,52	0,7988	4517,35	14,75
4.3		7,24	1182,20	1191,35	692,40	2,369										5457,69	0,8180	4464,39	13,88
PROMEDIO						2,380	2,418	2,435	0,313	80,644	2,274	17,083	19,356	6,207	88,253			4491,74	13,81
5.1	7,00	7,20	1186,70	1197,4	696,00	2,367										5351,35	0,8233	4405,94	13,27
5.2		7,15	1186,80	1194,3	693,40	2,369										5295,14	0,8300	4394,97	17,35
5.3		7,10	1190,80	1199,3	702,10	2,395										5219,16	0,8394	4380,83	15,45
PROMEDIO						2,377	2,395	2,412	0,317	80,125	1,449	18,426	19,875	6,706	92,707			4393,91	15,36

Fuente: Autor

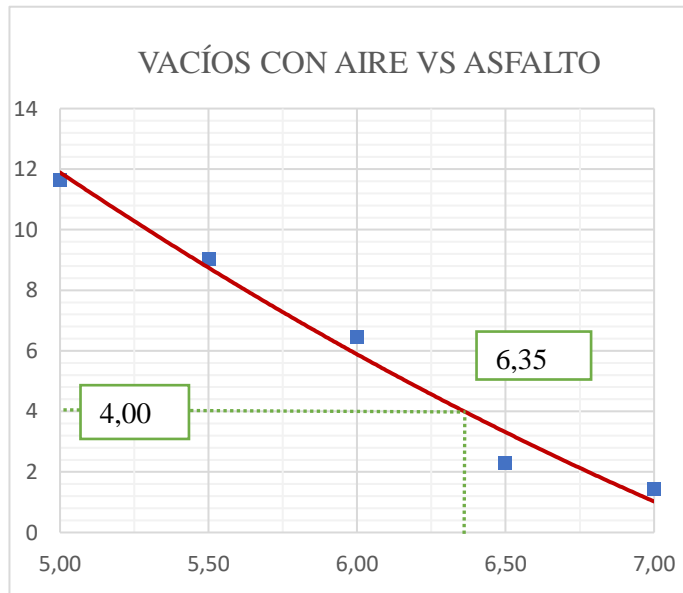
3.1.8 Determinación del contenido óptimo de asfalto para mezclas asfálticas tradicional

Gráfica 13. Peso específico Bulk vs % Cemento asfáltico



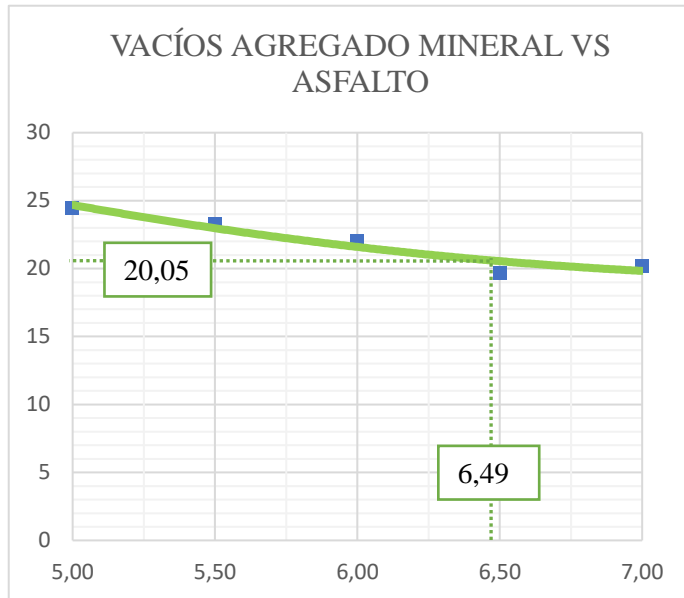
Fuente: Autor

Gráfica 14. Vacíos con aire vs % Cemento asfáltico



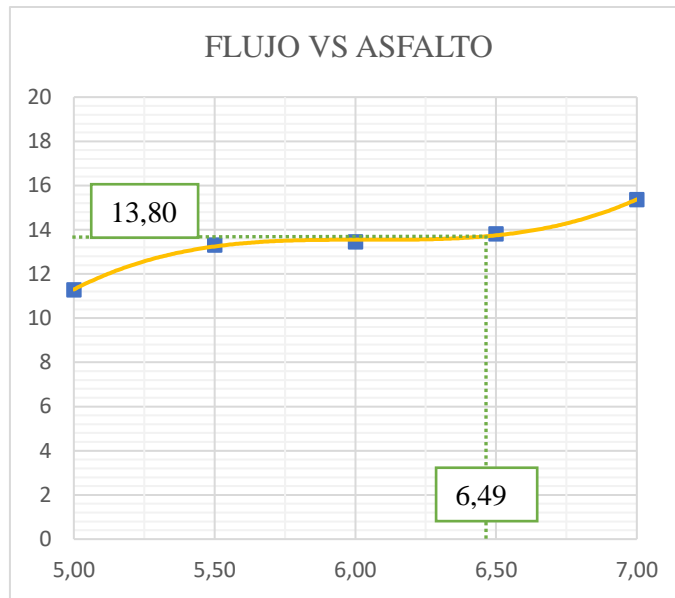
Fuente: Autor

Gráfica 15. Vacíos agregado mineral vs % Cemento asfáltico



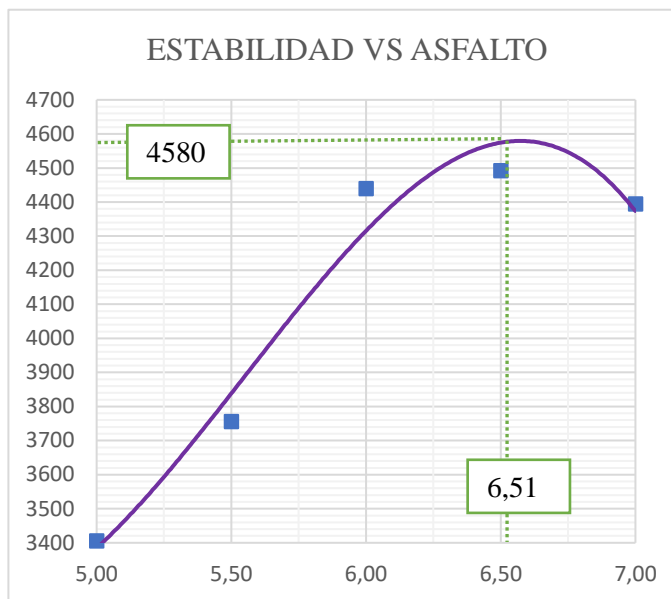
Fuente: Autor

Gráfica 16. Flujo vs % Cemento asfáltico



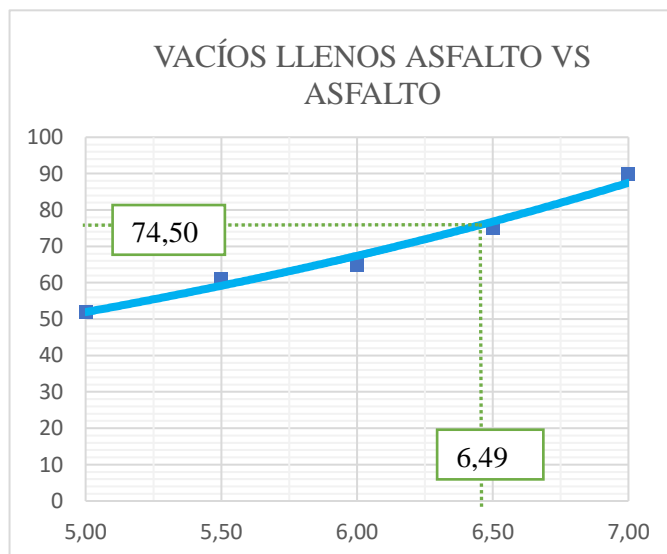
Fuente: Autor

Gráfica 17. Estabilidad vs % Cemento asfáltico



Fuente: Autor

Gráfica 18. Vacíos llenos de asfalto vs % Cemento asfáltico



Fuente: Autor

El contenido óptimo de cemento asfáltico se determina mediante las gráficas (Peso específico Bulk vs Cemento asfáltico), (Porcentaje de vacíos correspondiente al 4% vs Cemento asfáltico) y (Estabilidad vs Cemento asfáltico).

Los valores de contenido óptimo de cemento asfáltico respectivamente fueron: 6.60%, 6.35% y 6.51%, de los cuales realizamos un promedio obteniendo un 6.49% para la mezcla, es decir se encuentra dentro de las especificaciones de la metodología Marshall.

Gráfica 19. Briquetas compactadas



Fuente: Autor

Tabla 14. Resumen resultados obtenido por las gráficas por metodología Marshall.

Denominación	Valor	Unidad
Contenido óptimo	6,49	%
Vacíos con aire	3,80	%
Vacíos en agregados minerales	20,05	%
Vacíos rellenos de asfalto	74,50	%
Estabilidad	4580,00	lb
Flujo	13,80	1"/100

Fuente: Autor

Los resultados en la tabla se determinaron para un contenido óptimo de 6.49% de cemento asfáltico mediante las gráficas de la metodología Marshall.

3.1.9 Diseño Marshall de la mezcla asfáltica con fibra de vidrio

Para la realización de las briquetas con fibra de vidrio se usó el contenido óptimo de la mezcla asfáltica tradicional de 6.49%, calculada mediante metodología Marshall.

3.1.9.1 Dosificación de la fibra

Para la elaboración de las briquetas se reemplazaron porcentajes de agregado que retiene el tamiz 200, en 5%, 7.5%, 10%, 15% y 25%.

Gráfica 20. Briquetas con fibra de vidrio



Fuente: Autor

Por lo tanto, si para la realización de una briketa de 1200 gr tenemos un porcentaje de cemento asfáltico de 6.49%, y lo que retiene el tamiz 200 es el 10%. Entonces:

Tabla 15. Dosificación de la fibra de vidrio en la mezcla

Muestra	% cemento asfáltico (6,49%)	Muestra seca	tamiz 200	tamiz 200 (gr)	5%	7,5%	10%	15%	25%
1200	77,88	1122,12	10%	112,212	5,61	8,42	11,22	16,83	28,05

Fuente: Autor

3.1.9.2 Peso Específico “bulk”

$$G = \frac{D}{E - F}$$

Donde:

G = gravedad específica bulk

D = masa seca en aire

E = masa saturado superficie seca

F = masa sumergida en agua

$$G = \frac{1188.20}{1196.40 - 694.40}$$

$$G = 2.367$$

3.1.9.3 Peso específico máximo teórico

$$H = \frac{100}{\frac{\%Agreg}{Gagr} + \frac{\%CA}{Gasf}}$$

Donde:

H = peso específico máximo teórico

%Agreg = % agregado seco

%CA = % cemento asfáltico

Gagr = gravedad específica del agregado

Gasf = gravedad específica del asfalto

$$H = \frac{100}{\frac{93.51\%}{2.759} + \frac{6.49\%}{0.87}}$$

$$H = 2.418$$

3.1.9.4 Determinación de Rice

Tabla 16. Determinación de Rice de mezclas asfálticas con fibra de vidrio

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL							
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO MEZCLADO CON FIBRA DE VIDRIO, UTILIZANDO EL ENSAYO MARSHALL							
Origen:	Cantera Salvador						
Realizado por:	Erick Nicolás Bonilla Bravo					Fecha:	06/12/2023
Norma:	ASTM D 2041						
Sitio:	Laboratorio FICM - UTA						
Determinación de Rice							
Proceso	Denominación	Unidad	% de fibra de vidrio				
			5,00%	7,50%	10,00%	15,00%	25,00%
Peso de la muestra	A	gr	1356,00	1312,36	1395,20	1372,20	1325,00
Peso frasco + agua 25°C + muestra	B	gr	16591,10	16566,78	16622,12	16613,86	16589,10
Peso frasco + agua 25°C	C	gr	15791,50	15791,50	15791,50	15791,50	15791,50
Densidad Rice gr/cc	D = A/(A-(B-C))	gr	2,437	2,444	2,471	2,496	2,512

Fuente: Autor

3.1.9.5 Porcentaje de asfalto absorbido por peso del agregado seco

$$J = \frac{(I - H) * 10^4}{I * H * \%Agreg}$$

Donde:

J = % asfalto absorbido

I = Valor ensayo Rice

H = gravedad específica teórica

% Agreg = % agregado seco

$$J = \frac{(2.437 - 2.418) * 10^4}{2.437 * 2.418 * 93.51}$$

$$J = 0.341$$

3.1.9.6 Porcentaje en volumen del agregado con respecto al volumen total

$$K = \frac{\%Agreg * G}{Gagr}$$

Donde:

K = % volumen del agregado

G = gravedad específica bulk

% Agreg = % agregado seco

Gagr = gravedad específica del agregado

$$K = \frac{93.51 * 2.350}{2.759}$$

$$K = 78.481$$

3.1.9.7 Porcentaje de vacíos con aire respecto al volumen total

$$L = \left(1 - \frac{G}{I}\right) * 100$$

Donde:

L = % vacíos con aire

G = gravedad específica bulk

I = Valor ensayo Rice

$$L = \left(1 - \frac{2.350}{0.347}\right) * 100$$

$$L = 3.578$$

3.1.9.8 Volumen de asfalto efectivo como porcentaje de volumen total

$$M = 100 - K - L$$

Donde:

M = % volumen de asfalto efectivo

L = % vacíos con aire

K = % volumen del agregado

$$M = 100 - 79.641 - 3.578$$

$$M = 16.781$$

3.1.9.9 Porcentaje de vacíos que contienen los agregados de la mezcla

$$N = 100 - K$$

Donde:

N = % vacíos de agregados

K = % volumen del agregado

$$N = 100 - 79.641$$

$$N = 20.359$$

3.1.9.10 Contenido de asfalto efectivo con respecto al peso de la mezcla

$$O = \%CA - \frac{J * \%Agreg}{100}$$

Donde:

O = asfalto efectivo con respecto al peso de la mezcla

%CA = % cemento asfáltico

J = % asfalto absorbido

%Agreg = % agregado seco

$$O = 6.49\% - \frac{0.341 * 93.51\%}{100}$$

$$O = 6.172$$

3.1.9.11 Porcentaje de vacíos llenos de asfalto

$$P = \frac{N - L}{N} * 100$$

Donde:

P = % vacíos llenos de asfalto

N= % vacíos de agregados

L = % vacíos con aire

$$P = \frac{20.359 - 3.578}{20.359} * 100$$

$$P = 82.426$$

3.1.9.12 Corrección de estabilidad por altura

Registramos el factor de corrección, rectificamos los valores de estabilidad de cada probeta

$$S = Q * R$$

Donde:

S = corrección de estabilidad por altura

Q = factor de corrección por espesor

R = valor de estabilidad en libras

$$S = 5212.43 * 0.8367$$

$$S = 4361.07$$

Tabla 17. Ensayo Marshall para briquetas de mezcla asfáltica con fibra de vidrio

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ASFÁLTICO MEZCLADO CON FIBRA DE VIDRIO, UTILIZANDO EL ENSAYO MARSHALL																				
Realizado por: Erick Nicolás Bonilla Bravo										Fecha:				12/09/2023						
Diseño de la mezcla asfáltica por el método marshall																				
Peso específico de los agregados:				2,759		gr/cm3		Peso específico del asfalto:				0,87		gr/cm3						
Muestra No.	Cemento Asfáltico%	% Fibra de vidrio	Espesor Probeta (cm)	Peso en gramos			Peso Específico (gr/cm3)			Asfalto Absorbido %	Volumen -%Total			Vacíos en agregados minerales	% de asfalto efectivo	%vacíos llenos de asfalto	Estabilidad en libras			Flujo pulg/100
				Seca en aire	SSS en aire	En agua	Bulk (Gb)	Máximo Teórico	Máximo Medido		Agregado	Vacíos con Aire	Asfalto efectivo				Lectura dial	Factores corrección	Estabilidad Corregida	
A	B		C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1.1	6,49	5,00	7,10	1188,20	1196,40	694,40	2,367										5212,43	0,8367	4361,07	14,27
1.2			7,15	1180,16	1189,20	687,00	2,350										5068,94	0,8300	4207,22	14,65
1.3			7,20	1175,12	1182,60	678,80	2,333										4785,71	0,8233	3940,23	15,24
PROMEDIO							2,350	2,418	2,437	0,341	79,641	3,578	16,781	20,359	6,172	82,426			4073,73	14,72
1.1	6,49	7,50	7,20	1192,33	1203,47	695,42	2,347										4784,55	0,8233	3939,28	15,21
1.2			7,15	1187,69	1194,48	680,00	2,309										4389,87	0,8300	3643,59	15,17
1.3			7,20	1184,18	1192,62	675,80	2,291										4525,74	0,8233	3726,19	15,02
PROMEDIO							2,316	2,418	2,444	0,466	78,481	5,255	16,264	21,519	6,054	75,579			3684,89	15,13
2.1	6,49	10,00	7,20	1184,30	1193,10	658,60	2,216										4087,12	0,8233	3365,06	15,48
2.2			7,25	1187,12	1197,30	669,00	2,247										4215,65	0,8167	3442,78	15,19
2.3			7,20	1192,10	1208,00	677,40	2,247										3822,41	0,8233	3147,12	15,84
PROMEDIO							2,236	2,418	2,471	0,944	75,801	9,490	14,709	24,199	5,607	60,782			3318,32	15,50
3.1	6,49	15,00	7,20	1168,54	1172,12	633,10	2,168										4055,26	0,8233	3338,83	16,28
3.2			7,25	1179,21	1187,58	641,70	2,160										3847,18	0,8167	3141,86	16,62
3.3			7,30	1182,19	1191,55	661,80	2,232										3345,22	0,8100	2709,63	16,84
PROMEDIO							2,187	2,418	2,496	1,378	74,109	12,397	13,494	25,891	5,202	52,118			3024,23	16,58
3.1	6,49	25,00	7,30	1129,09	1148,50	618,90	2,132										3055,26	0,8100	2474,76	17,58
3.2			7,25	1140,15	1165,12	624,70	2,110										3247,18	0,8167	2651,86	19,42
3.3			7,30	1174,14	1189,15	644,80	2,157										3545,22	0,8100	2871,63	17,19
PROMEDIO							2,133	2,418	2,512	1,651	72,289	15,092	12,619	27,711	4,946	45,537			2673,19	18,06

Fuente: Autor

3.1.9.13 Determinación del contenido óptimo de fibra de vidrio para mezclas asfálticas

Evaluando los resultados obtenidos en la **Tabla 17**, en la cual podemos ver que el porcentaje de fibra de vidrio que mayores requerimientos cumple en base a los criterios Marshall es la de 5%, por lo cual será nuestro contenido óptimo de fibra de vidrio, con la cual compararemos los resultados obtenidos con los de la mezcla asfáltica tradicional.

Tabla 18. Resumen de propiedades marshall para el contenido óptimo de fibra de vidrio

Denominación	Valor	Unidad
Contenido optimo	6,49	%
Vacíos con aire	3,578	%
Vacíos en agregados minerales	20,675	%
Vacíos rellenos de asfalto	82.695	%
Estabilidad	4073.73	lb
Flujo	14.72	1"/100

Fuente: Autor

Fase 2

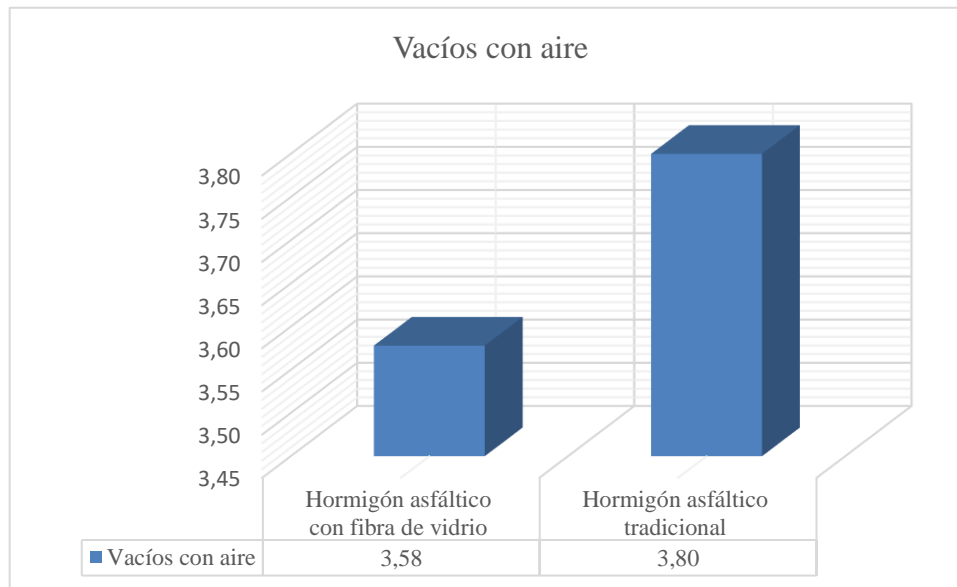
Realizados los ensayos mediante metodología marshall y obtenidos el contenido óptimo de cemento asfáltico y porcentaje de fibra de vidrio, se procedio al análisis de las propiedades Marshall; estabilidad, flujo, vacíos con aire, vacíos en agregados minerals y vacíos rellenos de asfalto.

Tabla 19. Propiedades Marshall de las mezclas asfálticas

Propiedades Marshall	Hormigón asfáltico con fibra de vidrio	Hormigón asfáltico tradicional
Estabilidad	4073,73	4580,00
Flujo	14,72	13,80
Vacíos con aire	3,58	3,80
Vacíos en agregados minerales	20,68	20,05
Vacíos rellenos de asfalto	82,70	74,50

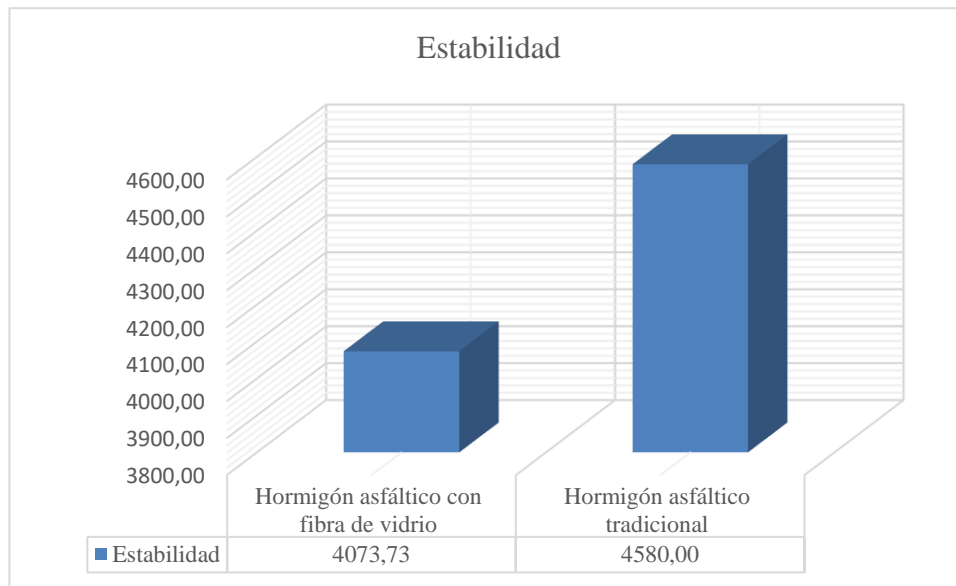
Fuente: Autor

Gráfica 21. Comparación de vacíos con aire de las mezclas asfálticas



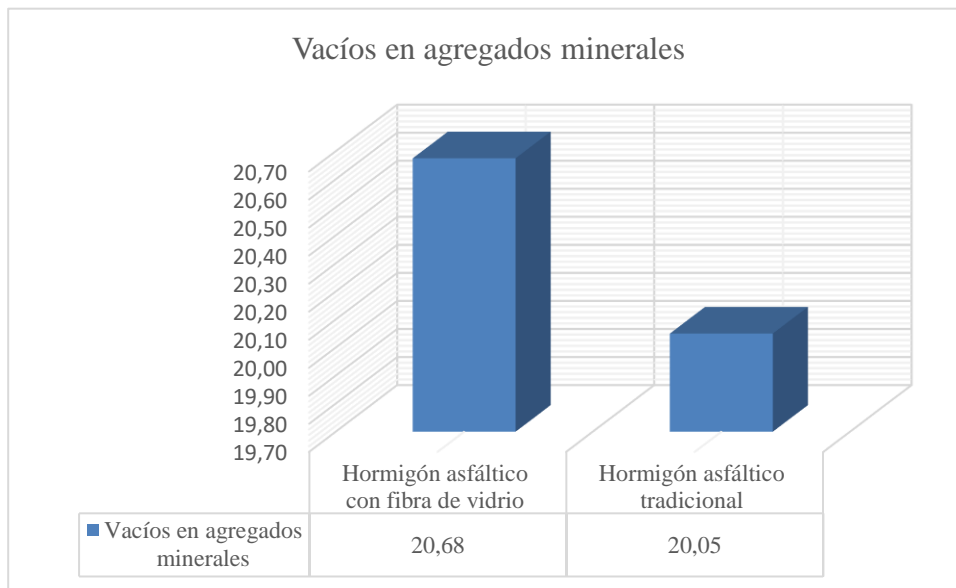
Fuente: Autor

Gráfica 22. Comparación de estabilidad de las mezclas asfálticas



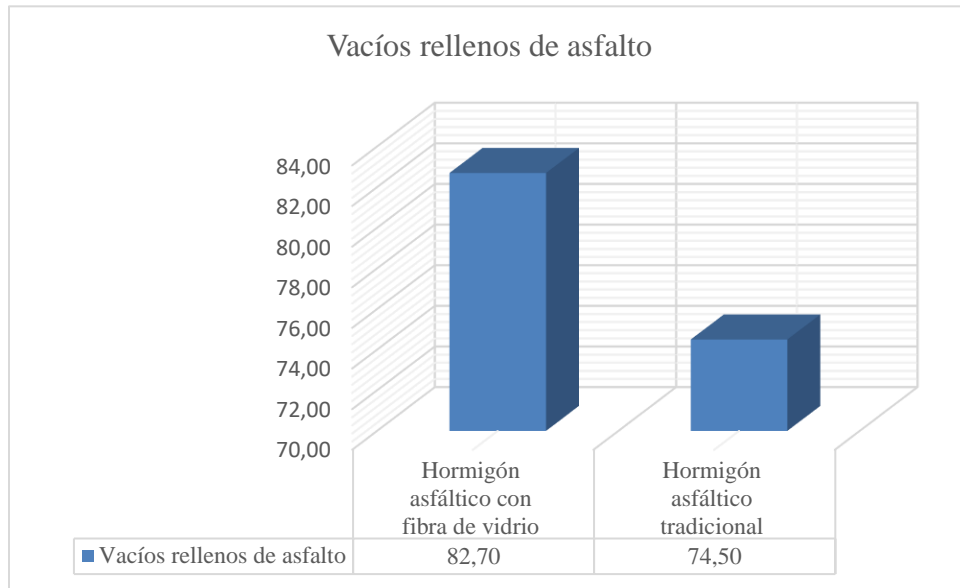
Fuente: Autor

Gráfica 23. Comparación de vacíos en agregado mineral de las mezclas asfálticas



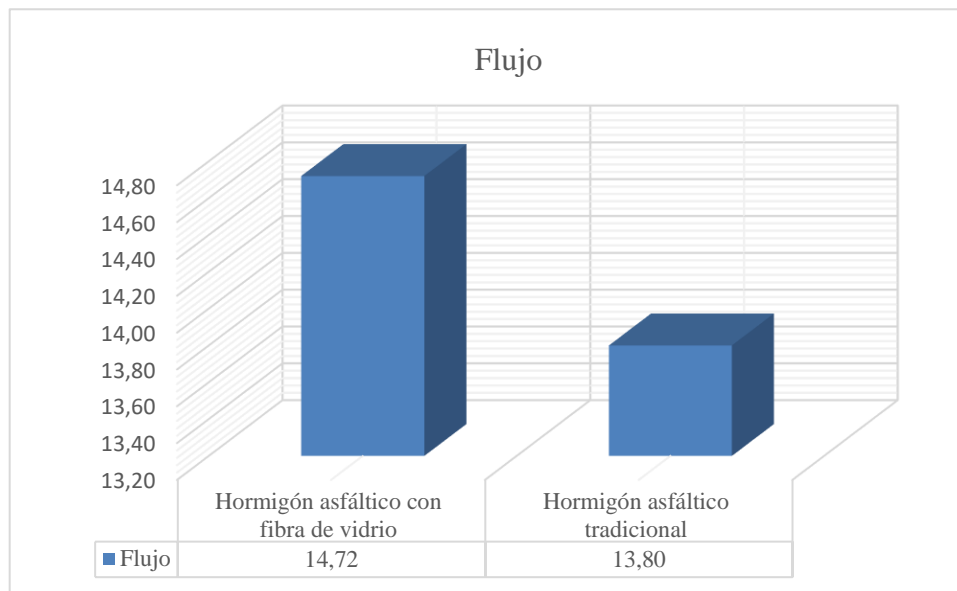
Fuente: Autor

Gráfica 24. Comparación de vacíos rellenos de asfalto de las mezclas asfálticas



Fuente: Autor

Gráfica 25. Comparación en agregados minerales aire de las mezclas asfálticas



Fuente: Autor

En el análisis comparativo de las gráficas, se observa una notoria diferencia en la estabilidad entre el hormigón asfáltico convencional y el hormigón asfáltico con fibras de vidrio, el hormigón asfáltico tradicional exhibe una mayor estabilidad en comparación con las fibras de vidrio, en cambio el flujo en el hormigón asfáltico con fibras de vidrio supera al convencional, la adición de fibras de vidrio proporciona al material una mayor capacidad de deformación, en la estructura interna de las mezclas, la presencia de fibras de vidrio conlleva una disminución en la cantidad de vacíos con aire en comparación con el hormigón asfáltico convencional, en lo que respecta a los vacíos en los agregados minerales, se observa que se mantienen en porcentajes similares entre ambas mezclas, este resultado sugiere que la incorporación de fibras de vidrio no afecta significativamente la porosidad de los agregados, se registra un aumento en los vacíos rellenos de asfalto en la mezcla con fibras de vidrio.

Fase 3

Se verifican los resultados obtenidos viendo si estos cumplen con las especificaciones para los hormigones asfálticos.

Tabla 20. Comparación de resultados de obtenidos en hormigón asfáltico tradicional

Denominación	Valor hormigón asfáltico con fibras de vidrio	Criterios de diseño Marshall	
		Min	Max
Estabilidad	4073,73	1800	
Flujo	14,72	8	16
Vacíos con aire	3,58	3	5
Vacíos rellenos de asfalto	82,70	65	75
Relación filler/betún	0,80	0,8	1,2
Vacíos en agregados minerales	20,68	14	

Fuente: Autor

Tabla 21. Comparación de resultados de obtenidos en hormigón asfáltico con fibras de vidrio

Denominación	Valor hormigón asfáltico tradicional	Criterios de diseño Marshall	
		Min	Max
Estabilidad	4580,00	1800	
Flujo	13,80	8	16
Vacíos con aire	3,80	3	5
Vacíos rellenos de asfalto	74,50	65	75
Relación filler/betún	0,80	0,8	1,2
Vacíos en agregados minerales	20,05	14	

Fuente: Autor

En las tablas se puede apreciar que, para el hormigón asfáltico tradicional con un contenido óptimo de cemento asfáltico de 6.49%, las propiedades cumplen con los criterios de diseño Marshall, mientras que para el hormigón asfáltico con fibras de vidrio estas no cumplen los vacíos llenos de asfalto superándolo en 5.5%.

La adición de fibras de vidrio aumenta la unión entre las partículas finas y gruesas de la mezcla asfáltica, por lo cual el índice de vacíos disminuye, referente a la estabilidad de las briquetas elaboradas con mezcla asfáltica con fibras de vidrio, estas cumplen con las especificaciones de la norma, pero al compararlas con las briquetas tradicionales estas son menor en un 11.05%, las cuales para un tráfico pesado pueden afectar a largo plazo, el flujo por otro lado, al ser mayor va a tender a la deformación de la vía.

3.2 Verificación de hipótesis

Después de llevar a cabo los ensayos tanto de los materiales como de las briquetas de hormigón asfáltico tradicional y hormigón asfáltico con fibras de vidrio, obteniendo así el contenido óptimo de fibra de vidrio como el porcentaje óptimo de fibra de vidrio, se comprueba que la estabilidad de la mezcla asfáltica tradicional es superior a la mezcla con fibras, por lo cual, revisados los datos obtenidos y los valores dados se concluye en base a la hipótesis planteada que, la aplicación de fibra de vidrio en hormigones asfálticos no mejora las propiedades Marshall.

CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se determino el contenido óptimo de cemento asfáltico mediante metodología Marshall, el contenido óptimo de cemento asfáltico es del 6.49%, considerando los parámetros del porcentaje de cemento asfáltico para obtener el máximo peso específico "Bulk", el porcentaje de cemento asfáltico para un índice de vacíos del 4%, y el porcentaje de cemento asfáltico para alcanzar la máxima estabilidad. Este valor cumple con los estándares Marshall establecidos.
- Calculado el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, se elaboraron las briquetas de hormigón asfáltico con vidrio con porcentajes de 5%, 7.5%, 10% 15% y 25% estos reemplazando la que retiene el tamiz 200, obteniendo así que el porcentaje óptimo de fibra de vidrio es de 5% al ser la que mejores propiedades Marshall presenta en comparación con los demás porcentajes.
- Se evidencio que, el uso de fibras de vidrio en hormigones asfálticos mejora la capacidad de deformación, tal es el caso que el flujo en el hormigón asfáltico tradicional es 13.80 mientras que con la fibra es de 14.72, pero en el caso de la estabilidad esta menora con la incorporación de las fibras entendiéndose así que esta resistirá menos a cargas por tráfico pesado.
- Durante la realización de los ensayos se observó que el uso de porcentajes altos de fibras de vidrio en las mezclas asfálticas posee bajo grado de trabajabilidad, debido que estas al ocupar más volumen absorben el cemento asfáltico, esto afecta debido a que las todas las partículas de la mezcla no se van a homogeneizar bien con el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, y esto a grandes cantidades puede representar un problema para su ejecución.

- En términos de eficiencia, se interpreta que el hormigón asfáltico con fibras de vidrio no demuestra mejoras significativas en las propiedades Marshall, ya que el hormigón asfáltico tradicional ofrece una mayor estabilidad, un flujo comparable y mejor resistencia al tráfico pesado.

4.2 Recomendaciones

- Es importante promover entre las nuevas generaciones de profesionales y empresas dedicadas a la construcción de asfaltos el desarrollo de nuevas tecnologías sostenibles, esto implica minimizar el impacto ambiental mediante la implementación de materiales reciclados en la elaboración de hormigones asfálticos.
- Para futuras investigaciones relacionadas con la fibra de vidrio, se recomienda una alta precaución durante el manejo y manipulación de este material, dado que al ser un material fino puede causar heridas y picazón si no se maneja adecuadamente.
- La temperatura del cemento asfáltico debe estar a la temperatura requerida, para la homogeneización con los agregados, ya que si esta no se encuentra a la temperatura requerida muchos agregados no se cubrirán completamente con el asfalto.
- Al momento de ensayar las briquetas, es importante no exceder los 30 minutos en baño maría a 60 °C. Si ese tiempo se sobrepasa, la briqueta puede ablandarse, lo que daría lugar a resultados erróneos.

MATERIALES DE REFERENCIA

Referencias Bibliográficas

- [1] E. F. Vanegas Manrique, L. I. Segura Calleja, y J. M. Ramírez Cuello, “Evaluación de una mezcla asfáltica modificada con vidrio templado molido por medio de la metodología marshall”, *Universidad Santo Tomás*, pp. 1–2, 2021.
- [2] L. Mardones Parra, A. Calabi Floody, E. Sánchez Alonso, y G. Valdés Vidal, “Evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con la incorporación de fibras sintéticas de aramida y polipropileno”, *Scielo*, pp. 1–18, 2018.
- [3] J. R. Bobadilla Peña, J. J. Tigre Acosta, F. L. Tesen Muñoz, y S. P. Muñoz Pérez, “Uso de polímeros en asfalto: una revisión”, *Scielo*, pp. 94–109, 2022.
- [4] C. H. Higuera Sandoval, X. V. Camargo Amaya, y E. A. Suárez Molano, “Efecto del envejecimiento en las propiedades del asfalto y de las mezclas asfálticas”, *Scielo*, pp. 335–349, 2015.
- [5] Y. I. Olivera Pérez, S. P. Guevara Saravia, y S. P. Muñoz Pérez, “Revisión sistemática de la literatura sobre la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón con fibras de origen artificial-natural”, *Scielo*, vol. 27, núm. 2, pp. 1–18, 2022.
- [6] P. Jaskuła, M. Stienss, y C. Szydłowski, “Effect of polymer fibres reinforcement on selected properties of asphalt mixtures”, *Scispace*, pp. 442–448, 2016.
- [7] M. M. Carrillo Cisneros y O. X. IpiALES Matango, “Estudio de Mezclas Asfálticas en Frío modificadas con fibras de vidrio”, Universidad Central del Ecuador, Quito, 2022.
- [8] C. E. JIMÉNEZ ROJANO, “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA ESTABILIDAD Y LA DEFORMACIÓN DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO CON FIBRAS CELULOSAS Y PAVIMENTO ASFÁLTICO TRADICIONAL”, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2016.
- [9] E. G. Quimbita Loma, “Evaluación del efecto de la adición de caucho vulcanizado triturado en mezclas asfálticas en frío”, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2023.

- [10] J. G. Bastidas Martínez y J. M. Sánchez Losada, “Evaluación de una mezcla asfáltica con incorporación de agregados reciclados de concreto tratados superficialmente con una solución química de sulfato de magnesio”, *Scielo*, vol. 32, núm. 1, pp. 9–23, 2022.
- [11] J. Bojorque Iñiguez, C. Flores, y M. Vásquez, “Parámetros Marshall para el control de calidad de mezclas asfálticas en caliente después de la construcción del pavimento”, *Scielo*, pp. 178–185, 2019.
- [12] O. J. Adrianzen Flores, J. J. Azula Vasquez, C. F. Pacherras Sánchez, y S. P. Muñoz Pérez, “Uso de distintos tipos de fibras para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica: Una revisión literaria”, *Scielo*, vol. 24, pp. 1–16, 2022.
- [13] A. Valeri, R. Ramos, D. Movilla Quesada, J. Vera Pacheco, O. Muñoz Caceres, y M. Lagos Varas, “ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL USO DE FIBRAS DE CELULOSA PROVENIENTES DEL RECICLAJE DE RESIDUOS COMO ADITIVO ESTABILIZANTE EN MEZCLAS ASFALTICAS POROSAS”, *YXCILA*, pp. 1–10, 2019.

Anexos



Cantera Salvador



Tamizado del agregado



Preparación del agregado fino



Expulsión de aire del picnómetro



Peso del agregado grueso en agua



Secado del agregado grueso



Peso muestra para ensayo de abrasión



Ensayo de abrasión



Preparación de los materiales para la mezcla asfáltica



Compactación de la muestra



Extracción de briquetas



Briquetas compactadas



Baño maría a 25°C



Peso de briquetas en agua



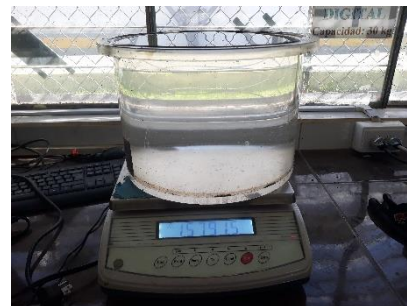
Briquetas en molde para el ensayo marshall



Ensayo de briquetas



Briquetas compactadas



Peso de agua más molde



Preparación de la muestra para ensayo Rice



Succión de aire



Dosificación con fibra de vidrio



Briquetas con fibra de vidrio



Baño maría a 60°C



Briquetas con fibra de vidrio compactadas