

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA CIVIL



**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL**

**TEMA: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DE ALTO
TRÁFICO CON POLVO DE LLANTA DE AVIÓN BAJO CONDICIONES CLIMÁTICAS
CRÍTICAS DE LLUVIA.**

**AUTORES: MOSQUERA MOLINA LIZBETH POLETTE, PACHACAMA OÑA JOSÉ
RICARDO**

DIRECTOR: ING. WILSON CANDO

QUITO - ECUADOR

DICIEMBRE 2024

Resumen

El presente trabajo de integración curricular se enfoca en el análisis del comportamiento de mezclas asfálticas de alto tráfico con la adición de polvo de llanta de avión bajo condiciones climáticas críticas de lluvia, evaluando su desempeño en comparación con los valores estándar establecidos por la normativa MOP-001F-2002. Para ello, se investigaron propiedades fundamentales como la estabilidad, el flujo, la relación filler/asfalto, los vacíos en el agregado mineral (VAM), los vacíos llenos con asfalto (VAF) y el porcentaje de vacíos totales en la mezcla.

Se elaboraron briquetas que fueron sometidas a condiciones normales de ensayo Marshall y a ensayos de saturación, con el objetivo de determinar el comportamiento de las mezclas y la pérdida de estabilidad bajo condiciones secas. Además, se realizaron ensayos complementarios, como el método RICE para establecer el peso específico máximo de la mezcla, y el ensayo de peladura para evaluar la adhesión entre el asfalto y los agregados en condiciones de alta humedad.

Los resultados experimentales obtenidos permitieron comparar las mezclas con polvo de llanta de avión frente a los requerimientos normativos, identificando las posibles causas de desviaciones y su impacto en el desempeño de la mezcla. Este análisis ofrece una perspectiva técnica sobre la viabilidad del uso de polvo de llanta en mezclas asfálticas sometidas a condiciones de lluvia y su capacidad para cumplir con las exigencias del tráfico intenso.

Abstract

This curricular integration project focuses on analyzing the behavior of high-traffic asphalt mixtures with the addition of aircraft tire powder under critical rainy weather conditions, evaluating their performance in comparison with the standard values established by the MOP-001F-2002 regulations. To achieve this, fundamental properties such as stability, flow, filler/asphalt ratio, voids in the mineral aggregate (VMA), voids filled with asphalt (VFA), and the total void percentage in the mixture were investigated.

Briquettes were produced and subjected to standard Marshall test conditions and saturation tests to determine the behavior of the mixtures and the stability loss under dry conditions. Additionally, complementary tests were performed, including the RICE method to establish the maximum specific gravity of the mixture, and the stripping test to evaluate the adhesion between asphalt and aggregates under high humidity conditions.

The experimental results allowed for a comparison of the mixtures containing aircraft tire powder against regulatory requirements, identifying potential causes of deviations and their impact on the mixture's performance. This analysis provides a technical perspective on the feasibility of using tire powder in asphalt mixtures exposed to rainy conditions and their ability to meet the demands of high-traffic applications.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. ALCANCE.....	1
1.3. ANTECEDENTES.....	2
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.5. OBJETIVOS.....	3
1.5.1. <i>Objetivo General</i>	3
1.5.2. <i>Objetivos específicos</i>	3
1.6. EL ASFALTO.....	4
1.6.1. <i>Definición</i>	4
1.6.2. <i>Propiedades físicas</i>	4
1.6.3. <i>Objetivos específicos</i>	7
1.7. HIPÓTESIS	7
CAPITULO II	7
2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	7
2.1. MATERIALES PÉTREOS.....	8
2.1.1. <i>Definición</i>	8
2.1.2. <i>Propiedades y características</i>	8
2.1.3. <i>Mezclas asfálticas en caliente</i>	9
2.1.4. <i>Ventajas y desventajas de las mezclas asfálticas calientes</i>	11
2.1.5. <i>Mezclas asfálticas de alto tráfico</i>	12
CAPITULO III	13
3. ENSAYOS DE LOS MATERIALES.	13
3.1. ENSAYOS DE LOS MATERIALES PÉTREOS	13
3.1.1. <i>Equivalente de arena en el agregado fino (ASTM D2419-14)</i>	13
3.1.2. <i>Gravedad específica y porcentaje de absorción del material pétreo</i>	14
3.1.3. <i>Resistencia a los sulfatos de los agregados finos y gruesos (ASTM C88)</i>	16
3.1.4. <i>Resistencia a la degradación del agregado grueso sometido a abrasión e impacto mediante la máquina de Los Ángeles (ASTM C131/131M-20)</i>	17
3.1.5. <i>Tabla de resultados</i>	18

CAPITULO IV	19
4. ENSAYOS.	19
4.1. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE SEGÚN EL MÉTODO MARSHALL	19
4.1.1. <i>Materiales componentes de la mezcla asfáltica.</i>	19
4.1.2. <i>Moldeo de Briquetas.</i>	21
4.2. TRÁFICO PESADO (CRITERIO MARSHALL).	22
4.2.1. <i>Capas de rodadura (Carpeta Asfáltica 1/2”).</i>	23
4.2.2. <i>Propiedades de la mezcla asfáltica obtenidas con 6,1% de cemento asfáltico (AC-20).</i>	23
4.3. PROPIEDADES DE MEZCLA ASFÁLTICA.....	25
4.3.1. <i>Carpeta asfáltica en caliente ½”</i>	26
4.4. ELABORACIÓN DE BRIQUETAS.	27
4.4.1. <i>Compactación de las briquetas.</i>	28
4.5. ENSAYO MARSHALL.	31
4.5.1. <i>Determinación del Peso Específico “BULK” (densidad aparente).</i>	31
4.5.2. <i>Ensayo de Estabilidad y Flujo.</i>	31
4.6. ENSAYOS COMPLEMENTARIOS.	35
4.6.1. <i>Ensayo Rice (Determinación de la Densidad y Análisis de Vacíos).</i>	35
4.6.2. <i>Ensayo de Peladura.</i>	37
CAPITULO V	39
5. CÁLCULOS Y RESULTADOS.	39
5.1. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS SEGÚN MÉTODO MARSHALL	40
5.2. CÁLCULOS	41
5.2.1. <i>Volumen de briqueta:</i>	41
5.2.2. <i>Peso Específico Bulk:</i>	41
5.2.3. <i>Vacíos con aire:</i>	41
5.2.4. <i>Porcentaje en volumen del agregado vs volumen total</i>	42
5.2.5. <i>Porcentaje de vacíos en el agregado mineral</i>	42
5.2.6. <i>Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VAF).</i>	43
5.2.7. <i>Estabilidad y flujo.</i>	44
5.2.8. <i>Ensayo de peladura.</i>	44
5.3. RESULTADOS.....	45
5.3.1. <i>Ensayos marshall para muestras en condiciones normales.</i>	45
5.3.2. <i>Ensayos complementarios (rice, peladura)</i>	47

CAPITULO VI50

6. ANÁLISIS Y COMPARACIONES.50

6.1. ANÁLISIS DE BRIQUETAS EN CONDICIONES SECAS. 50

6.2. ANÁLISIS DE BRIQUETAS EN CONDICIONES SATURADAS. 52

6.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE BRIQUETAS ENSAYADAS EN CONDICIONES SECAS Y EN CONDICIONES SATURADAS.
54

6.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS, BRIQUETAS CON POLVO DE LLANTA DE AVIÓN Y BRIQUETAS SIN POLVO DE LLANTA DE
AVIÓN. 55

CAPITULO VII59

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....59

7.1. CONCLUSIONES..... 59

7.2. RECOMENDACIONES. 61

8. BIBLIOGRAFIA.....61

9. ANEXOS63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Ubicación Planta asfáltica TEA – Guayllabamba	7
Ilustración 2 Ubicación Planta asfáltica TEA – Guayllabamba	7
Ilustración 3 Granulometría ½” MOP-F2002.	26
Ilustración 4 Mezcla asfáltica.	27
Ilustración 5 Tabla de % ideal de neumático.	27
Ilustración 6 Neumático (polvo de llanta de avión)	28
Ilustración 7 Martillo compactador eléctrico.	29
Ilustración 8 Gato hidráulico.	30
Ilustración 9 Briquetas.	30
Ilustración 10 Briquetas durante las 22 horas a 60°C ± 1°C	32
Ilustración 11 Briquetas a 25°C ± 1°C sumergidas durante 2 horas.	32
Ilustración 12 Ensayo de Estabilidad y Flujo (Prensa Marshall).	34
Ilustración 13 Muestra seca en el horno.	36
Ilustración 14 Peso de la muestra.	36
Ilustración 15 Ensayo Rice	37
Ilustración 16 Ensayo Rice	37
Ilustración 17 Muestra asfáltica sumergida a 60°C.	38
Ilustración 18 Análisis manual visual ensayo Peladura.	38
Ilustración 19 Colocación de briquetas en baño María	45
Ilustración 20 Briquetas luego de permanecer 22 horas en baño María	46
Ilustración 21 Cálculos del ensayo Marshall para muestras en estado seco y saturado.	46
Ilustración 22 Preparación de muestra para ensayo RICE	47
Ilustración 23 Análisis manual visual ensayo Peladura.	50

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Requerimientos para el ligante asfáltico clasificado por su viscosidad a 60°C	6
Tabla 2	Requerimientos para el ligante asfáltico clasificado por su viscosidad a 60°C	6
Tabla 3	% en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	10
Tabla 4	% de VAM mínimo para agregado de mezcla asfáltica	11
Tabla 5	Especificaciones mínimas de mezclas asfálticas en función del tipo de tráfico	12
Tabla 6	Especificaciones de carga para la máquina de Los Ángeles	18
Tabla 7	Gradación de las muestras de ensayo	18
Tabla 8	Gradación de las muestras de ensayo	19
Tabla 9	Resultados de Ensayos de Laboratorio de los Agregados que intervienen en el Diseño. ..	20
Tabla 10	Análisis Granulométrico de los Agregados	20
Tabla 11	Combinación de porcentajes de Agregados para el Diseño	21
Tabla 12	Agregado gruesos y finos	22
Tabla 13	Especificaciones técnicas que deben cumplir las mezclas asfálticas en caliente.	23
Tabla 14	Datos para planta asfáltica.	23
Tabla 15	Propiedades de la mezcla asfáltica.	23
Tabla 16	Curva Granulometría Marshall.	24
Tabla 17	Estabilidad corregida – Diseño Marshall.	25
Tabla 18	Corrección de los valores de estabilidad.	33
Tabla 19	Resultados ensayo RICE 4 en condición seca	48
Tabla 20	Resultados ensayo RICE 2 en condición seca	48
Tabla 21	Resultados ensayo RICE 1 en condición seca	48
Tabla 22	Resultados ensayo RICE 1 en condición saturada	49
Tabla 23	Resultados ensayo RICE 6 en condición saturada	49
Tabla 24	Resultados ensayo RICE 1 en condición saturada	49
Tabla 25	Análisis de un conjunto de 3 briquetas en condiciones seca	51
Tabla 26	Rangos de comparación con los valores obtenidos de las briquetas secas	51
Tabla 27	Análisis de un conjunto de 3 briquetas en condiciones saturadas	52
Tabla 28	Rangos de comparación con los valores obtenidos de las briquetas saturadas	53
Tabla 29	Comparación de resultados de briquetas	54
Tabla 30	Comparación de briquetas secas con y sin polvo de llantas de avión	55
Tabla 31	Comparación de briquetas saturadas con y sin polvo de llantas de avión	57

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

El aumento del tráfico aéreo en aeropuertos internacionales, como el Mariscal Sucre de Quito, requiere soluciones innovadoras para mejorar la durabilidad de las mezclas asfálticas, en este contexto, el polvo de llanta de avión es una alternativa sostenible y eficiente en comparación con las técnicas convencionales para mejorar las mezclas asfálticas.

Es importante que el enfoque de esta investigación se justifica por varios aspectos clave. En primer lugar, la reutilización de estos materiales en la construcción de vías críticas no solo contribuye a la reducción de residuos sólidos, sino que también promueve prácticas de fomento de la economía circular. En segundo lugar, el uso de polvo de llanta de avión en mezclas asfálticas podría mejorar las propiedades mecánicas del pavimento, como su estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos; lo cual es crucial en la operación diaria de un aeropuerto de alto tráfico como el Mariscal Sucre (Quiport) en Quito, Ecuador.

Además, este estudio proporcionará un marco de referencia valioso para futuras investigaciones y aplicaciones en otros aeropuertos del país en donde se pueda implementar este tipo de técnicas.

1.2. Alcance

El presente trabajo de integración curricular tiene como principal función verificar que la resistencia de una mezcla asfáltica de alto tráfico con polvo de llanta de avión cumpla con los estándares de calidad mínimos cuando la mezcla se encuentra en inmersión y en condiciones del ensayo Marshall normales con la finalidad de comparar ambos resultados y corroborar que el diseño realizado fue el ideal para las condiciones de tráfico requeridas.

1.3. Antecedentes

El tema referente en mezclas asfálticas y principalmente a la introducción cuál el uso de polvo de caucho proveniente de llantas con modificador de asfalto fue desarrollado por Charles McDonald's en los años 60 para tratamientos superficiales y bacheos en los años 70 su uso se extendió en Europa principalmente en Bélgica y Francia. citar

En América latina específicamente en México y en Colombia en Brasil existen tramos de prueba al igual que en Argentina desde el año 2002 y en Chile desde el año 2004

El empleo de polvo de llanta en las mezclas asfálticas, especialmente en las variedades en frío, ha ido desarrollándose de manera gradual a lo largo del tiempo en respuesta a preocupaciones ambientales y de sostenibilidad. Su inicio no puede ser atribuido a una única entidad, sino que ha surgido como resultado de diversos esfuerzos y avances en la industria de la construcción de carreteras y la gestión de residuos. Sin embargo, el interés por utilizar polvo de llanta en mezclas asfálticas ha ganado importancia durante las últimas décadas del siglo XX. Esto se debe, en parte, al creciente volumen de neumáticos desechados, lo que ha generado la necesidad de encontrar métodos más sostenibles para manejar estos residuos y minimizar su impacto ambiental. A continuación, se mencionan los principales estudios que serán referenciados en este proyecto de integración curricular:

- Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de 0Neumáticos de Automotores.
- Efecto de la adición del polvo de llantas desechadas en mezclas asfálticas en frío con el 100% de agregados reciclados.
- Uso del caucho granulado en mezclas asfálticas.

1.4. Justificación

La preocupación de implementar nuevas técnicas sostenibles en el ámbito vial especialmente en las mezclas asfálticas es un factor determinante en la estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos; como sabemos las pistas de aterrizaje de los aeropuertos están sometidas a condiciones extremas. Uno de nuestros desafíos es poder determinar la colocación de polvo de llanta de avión como aditivo en la mezcla asfáltica en caliente, proponiendo un enfoque innovador para comprobar si las propiedades del pavimento a comparación de ensayos entre briquetas secas y húmedas cumplen lo sugerido según la normativa MOP-001F-2002 405. Sin embargo, aún no se ha estudiado completamente cómo este aditivo influye en la comparación entre briquetas secas y húmedas, lo cual es esencial para determinar su comportamiento real verificado en los diferentes ensayos Marshall y Rice realizados en el laboratorio de pavimentos de la PUCE.

Por lo tanto, nuestra investigación surge de la necesidad de obtener datos comparativos que permitan determinar si nuestra propuesta es innovadora, viable y conforme a la normativa MOP-001F-2002 405

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

- Comparar el desempeño de las briquetas secas y húmedas agregando un porcentaje de polvo de llanta de avión bajo condiciones de alto tráfico y exposición a la lluvia en el diseño de la mezcla en caliente de la Planta Asfáltica TEA.

1.5.2. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del polvo de llanta de avión en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, analizando su comportamiento bajo condiciones de alto tráfico y lluvia.
- Determinar el impacto de las condiciones climáticas críticas de lluvia en la durabilidad y

desempeño de las mezclas asfálticas que contienen polvo de llanta de avión.

- Comparar el comportamiento de las mezclas asfálticas con y sin polvo de llanta de avión en términos de capacidad de drenaje y retención de agua bajo condiciones de lluvia.

1.6. El asfalto

1.6.1. Definición

Según (The Asphalt Institute, 2020), el asfalto, llamado también aglutinante de asfalto o cemento de asfalto, es un material de color marrón oscuro a negro en donde sus constituyentes predominantes son betunes los cuales se encuentran en la naturaleza o se obtienen de los derivados del petróleo. Usualmente se emplea para pavimentar caminos o como revestimiento impermeable de tejados y cubiertas.

1.6.2. Propiedades físicas

Dentro de las propiedades físicas de mayor importancia ya sea para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras se debe tener en cuenta las siguientes:

- **Durabilidad:** Se habla de cuánto tiempo el asfalto puede mantener sus características cuando este se encuentra expuesto a procesos de degradación y envejecimiento. (Araiza Armenta, Juan Alberto, 2002)
- **Adhesión:** capacidad que tiene el asfalto para adherirse al agregado durante la mezcla asfáltica. (Araiza Armenta, Juan Alberto, 2002)
- **Cohesión:** capacidad del asfalto para mantener unidas las partículas del material pétreo una vez terminado el proceso de pavimentación. (Araiza Armenta, Juan Alberto, 2002)
- **Susceptibilidad a la temperatura:** dentro de las características más importantes que el asfalto debe cumplir es la susceptibilidad a la temperatura ya que como es conocido, este se vuelve más duro (más viscoso) a medida que la temperatura baja y más blando (menos

viscoso) cuando la temperatura aumenta. Por esta razón, el asfalto debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas del agregado durante la mezcla, permitiendo a las mismas se desplacen unas respecto a otras en el proceso de compactación. Luego deberá volverse viscoso, a temperaturas normales, para que las partículas del agregado se mantengan unidas. (Araiza Armenta, Juan Alberto, 2002)

- **Envejecimiento:** el envejecimiento de los asfaltos se produce en dos etapas. La primera cuando existen cambios generados en el proceso de construcción y la segunda es un proceso en donde las propiedades fisicoquímicas del material se alteran y por ende la durabilidad de este también se ve afectada, ocasionando pérdidas económicas por deterioros prematuros de las carpetas asfálticas durante su vida de servicio. (Reyes & Vargas , 2010)
- **Endurecimiento:** este proceso tiene a ocurrir durante la construcción y en el pavimento terminado. Esto se debe principalmente a un proceso de oxidación, es decir, el asfalto combinado con el oxígeno. (Araiza Armenta, Juan Alberto, 2002)
- **Viscosidad:** El asfalto cuando es calentado a una temperatura que está por encima de su punto de inflamación empieza a fluidificarse y sus propiedades mecánicas se pueden definir por su viscosidad.

Para los trabajos de pavimentación, se requieren valores de viscosidad a temperaturas de 60° C y 135° C. La viscosidad a una temperatura de 60° C sirve para la clasificación del cemento asfáltico y, a 135° C, corresponde a la viscosidad del asfalto durante la mezcla y su colocación. (Araiza Armenta, Juan Alberto, 2002)

Cabe recalcar, que conocer la consistencia de un asfalto a estas dos temperaturas ayuda a determinar si el asfalto que se está usando es o no adecuado para el diseño correspondiente.

La Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2515:2010, Esta norma se aplica a los cementos asfálticos, utilizados como materiales de pavimentación para la construcción y mantenimiento de carreteras, además de otros usos industriales.

Los cementos asfálticos según su viscosidad se clasifican en:

Tabla 1 Requerimientos para el ligante asfáltico clasificado por su viscosidad a 60°C

Test	Viscosity Grade				
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-40
Viscosity, 60°C (140°F), Pa·s (Poises)	25 ± 5 (250 ± 50)	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1000 ± 200)	200 ± 40 (2000 ± 400)	400 ± 80 (4000 ± 800)
Viscosity, 135°C (275°F), mm ² /s—minimum	80	100	150	210	300
Penetration, 25°C (77°F), 100 g, 5 s—minimum	200	120	70	40	20
Flash point, COC, °C (°F)—minimum	163 (325)	177 (350)	219 (425)	232 (450)	232 (450)
Solubility in trichloroethylene, percent—minimum	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Tests on residue from thin-film oven test:					
Viscosity, 60°C (140°F), Pa·s (Poises), maximum	100 (1000)	200 (2000)	400 (4000)	800 (8000)	1600 (16000)
Ductility, 25°C (77°F), 5 cm/min, cm—minimum	100 ^a	100	50	20	10
Spot test (when and as specified) ^b with:					
Standard naphtha solvent	Negative for all grades				
Naphtha-xylene solvent, percent xylene	Negative for all grades				
Heptane-xylene solvent, percent xylene	Negative for all grades				

^a If ductility is less than 100 cm, material will be accepted if ductility at 15.6°C (60°F) is 100 cm minimum.

^b The use of the spot test is optional. When it is specified, the engineer shall indicate whether the standard naphtha solvent, the naphtha-xylene solvent, or the heptane-xylene solvent will be used in determining compliance with the requirement, and also, in the case of xylene solvents, the percentage of xylene to be used.

Fuente: (AASHTO Designation, 2004)

Tabla 2 Requerimientos para el ligante asfáltico clasificado por su viscosidad a 60°C

Test	Viscosity Grade					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosity, 60°C (140°F), Pa·s (Poises)	25 ± 5 (250 ± 50)	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1000 ± 200)	200 ± 40 (2000 ± 400)	300 ± 60 (3000 ± 600)	400 ± 80 (4000 ± 800)
Viscosity, 135°C (275°F), mm ² /s—minimum	125	175	250	300	350	400
Penetration, 25°C (77°F), 100 g, 5 s—minimum	220	140	80	50	40	40
Flash point, COC, °C (°F)—minimum	163 (325)	177 (350)	219 (425)	232 (450)	232 (450)	232 (450)
Solubility in trichloroethylene, percent—minimum	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Tests on residue from thin-film oven test:						
Loss on heating percent—maximum ^a	—	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
Viscosity, 60°C (140°F), Pa·s (Poises)—maximum	100 (1000)	200 (2000)	400 (4000)	800 (8000)	1200 (12000)	1600 (16000)
Ductility, 25°C (77°F), 5 cm/min, cm—minimum	100 ^b	100	75	50	40	25
Spot test (when and as specified) ^c with:						
Standard naphtha solvent	Negative for all grades					
Naphtha-xylene solvent, percent xylene	Negative for all grades					
Heptane-xylene solvent, percent xylene	Negative for all grades					

^a The use of loss on heating requirement is optional.

^b If ductility is less than 100 cm, material will be accepted if ductility at 15.6°C (60°F) is 100 cm minimum.

^c The use of the spot test is optional. When it is specified, the engineer shall indicate whether the standard naphtha solvent, the naphtha-xylene solvent, or the heptane-xylene solvent will be used in determining compliance with the requirement, and also, in the case of xylene solvents, the percentage of xylene to be used.

Fuente: (AASHTO Designation, 2004)

Para el caso de estudio se utilizará el asfalto AC-20, el cual su material bituminoso será cemento asfáltico producido en la refinera Esmeraldas

1.6.3. Objetivos específicos:

- Agregar el 1.5% de neumático (polvo de llanta de avión) en la mezcla asfáltica en caliente.
- Verificar la estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos de las briquetas secas y húmedas.
- Visualizar mediante el ensayo de peladura si los materiales están perfectamente adheridos a los materiales referentes de la mezcla.

1.7. Hipótesis

Una vez finalizados los ensayos, se espera que la pérdida de estabilidad de la muestra sometida a inmersión, en comparación con las muestras ensayadas en condiciones estándar, no supere el 50%. Esto con el fin de garantizar que el comportamiento de la muestra se ajuste a las especificaciones previstas en el diseño tanto en condiciones climáticas secas como saturadas.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Ilustración 1 Ubicación Planta asfáltica TEA – Guayllabamba



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

Ilustración 2 Ubicación Planta asfáltica TEA – Guayllabamba



Fuente: (Google Maps, 2024)

2.1. Materiales Pétreos

2.1.1. Definición

En el ámbito de los pavimentos, los agregados o materiales pétreos hacen referencia a un conjunto de partículas inertes, como gravas, arenas, finos o fillers, que se utilizan en la fabricación de productos artificiales de alta resistencia. Estos materiales se mezclan con aglomerantes hidráulicos (como cemento o cal) o con ligantes asfálticos, permitiendo así obtener una estructura sólida y duradera (Padilla Rodríguez, 2004).

2.1.2. Propiedades y características

Los materiales pétreos utilizados en las mezclas asfálticas deben cumplir con estrictos estándares de durabilidad, textura y resistencia mecánica, dado que constituyen entre el 88% y el 96% de la masa y alrededor del 75% del volumen total. La correcta selección del agregado determina el comportamiento del pavimento, ya que soporta las cargas del tráfico y las transfiere a las capas inferiores; además, la calidad de estos materiales influye directamente en el desarrollo de fallas comunes como el ahuellamiento, la fatiga, el agrietamiento y los daños provocados por la humedad. (Rondón Quintana, H., & Reyes Lizcano, F., 2015)

Dentro de las especificaciones de la MTOP-001-F 2002 los agregados deben cumplir con

las siguientes características:

- Los agregados se compondrán de fragmentos angulosos o semi-angulosos y ásperos; limpios, resistentes y duros. Estarán libres de materia vegetal y de exceso de partículas planas, alargadas, blandas, así como de material mineral, cubierto de arcilla u otro material inconveniente. (MTOP-001-F, 2002)
- Granulometría
- Capacidad de absorción, densidad y porosidad
- Afinidad con el asfalto.

Los agregados que se utilizan para mezclas asfálticas deben cumplir con una granulometría especificada por la (MTOP-001-F, 2002), para esto clasifica a los agregados de la siguiente manera:

- Agregado grueso: las partículas de este agregado son retenidas en el tamiz N°4 (4,75 mm).
- Agregado fino: material cuyas partículas pasan por el tamiz N°4 (4,75mm) y son retenidas en el tamiz N°200.
- Polvo mineral o filler: porción del material el cual pasa por el tamiz N°200.

2.1.3. Mezclas asfálticas en caliente

Una mezcla asfáltica en caliente es una combinación homogénea de material pétreo, asfalto y aditivos, como polvo de llanta de avión, que se elaboran en caliente en una planta mezcladora o de forma manual con el equipo necesario para calentar los componentes y obtener una mezcla uniforme.

Un pavimento de alto tráfico se refiere a un pavimento diseñado para soportar una alta intensidad de tráfico durante su vida útil. En algunos casos, se puede mejorar la resistencia y

durabilidad añadiendo materiales como polvo de llanta de avión a la mezcla.

Una briqueta es un bloque sólido compactado compuesto por materiales como agregados y mezcla asfáltica, y puede incluir aditivos como polvo de llanta de avión. Las briquetas se utilizan para evaluar la resistencia de la mezcla bajo condiciones específicas de laboratorio.

Un agregado es un conjunto de materiales granulares sólidos que se emplean habitualmente en la construcción, y que pueden combinarse con aditivos como polvo de llanta de avión para mejorar sus propiedades.

A continuación, se presenta una tabla de la normativa MOP 2002-001-F, la cual indica la granulometría que deberán emplearse en los agregados para una mezcla asfáltica:

Tabla 3 % en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	Nº4
1" (25.4 mm.)	100	--	--	--
¾" (19.0 mm.)	90 - 100	100	--	--
½" (12.7 mm.)	--	90 - 100	100	--
3/8" (9.50 mm.)	56 - 80		90 - 100	100
Nº 4 (4.75 mm.)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100
Nº 8 (2.36 mm.)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
Nº 16 (1.18 mm.)	--	--	--	40 - 80
Nº 30 (0.60 mm.)	--	--	--	25 - 65
Nº 50 (0.30 mm.)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
Nº 100 (0.15 mm.)	--	--	--	3 - 20
Nº 200 (0.075 mm.)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Fuente: (MOP-001-F, 2002)

Por otra parte, los agregados utilizados en una mezcla asfáltica deben satisfacer requisitos mínimos de calidad para garantizar su adecuación en la composición de la mezcla. Uno de los parámetros clave para esta evaluación es el porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM), que permite determinar la compactación y durabilidad del material según las especificaciones técnicas establecidas. (MOP-001-F, 2002)

Tabla 4 % de VAM mínimo para agregado de mezcla asfáltica

TIPO DE MEZCLA	VAM, mínimo (%)
A (3/4")	16
B (1/2")	15
C, D (3/8")	14
E (#4)	13

Fuente: (MTOF-001-F, 2002)

2.1.4. Ventajas y desventajas de las mezclas asfálticas calientes

Ventajas

La utilización del asfalto tiene sus raíces en miles de años. Las primeras aplicaciones del asfalto son en la impermeabilización de presas y depósitos de agua. Hay pruebas de caminos de hace 4000 años antes de Cristo. El porcentaje de asfalto generalmente se ajusta entre un rango de 4 a 5% dependiendo de los criterios de estabilidad y flujo evaluados en las pruebas de laboratorio, como el método Marshall en nuestro caso se utilizó el porcentaje de 6.1% dado por las pruebas realizadas en la planta asfáltica TEA

En general, comparando las mezclas asfálticas tibias(WMA) con las mezclas asfálticas en caliente (HMA), se reportó que se obtiene una reducción del 24% en el impacto de la contaminación del aire, un 18% en el consumo de combustible fósil y un 15% en los impactos negativos ambientales totales.

Desventajas

A pesar de que existen estudios donde se demuestra la reducción en el impacto ambiental al usar la tecnología de reducción de temperatura, no se han llevado a cabo estudios en los cuales se mida el impacto que causa la fabricación y empleo de aditivos tanto orgánicos, químicos y

sintéticos durante la producción de las HMA. En ocasiones, se ha visto que las propiedades tanto físicas como mecánicas de las WMA tienen menor calidad que las HMA. Estas propiedades se pueden ver afectadas por el tipo de aditivo que se use o por el método de fabricación.

2.1.5. Mezclas asfálticas de alto tráfico

Una mezcla asfáltica destinada para alto tráfico, también conocida como mezcla para tráfico pesado o muy pesado, se refiere a aquellas formulaciones diseñadas específicamente para soportar niveles elevados de tránsito. Esto implica una mayor presencia de vehículos pesados, como autobuses y camiones, o un volumen vehicular significativamente alto. Por tanto, el diseño de este tipo de mezcla debe incorporar propiedades técnicas superiores que garanticen un desempeño adecuado y prolonguen la vida útil del pavimento flexible bajo dichas condiciones de carga y esfuerzo.

La normativa MOP 2002-001-F propone una serie de valores mínimos que los pavimentos de alto tráfico deberán cumplir al momento de ser ensayados en laboratorio: •

- Número de Golpes por cara: 75
- Estabilidad (lb): ≥ 1800 (tráfico pesado), ≥ 2200 (tráfico muy pesado)
- Flujo (in/100): Mínimo 8, Máximo 14
- Relación Filler/asfalto: Mínimo 0.8, Máximo 1.2

Tabla 5 Especificaciones mínimas de mezclas asfálticas en función del tipo de tráfico

TIPO DE TRAFICO	Muy Pesado		Pesado		Medio		Liviano	
CRITERIOS MARSHALL	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
No. De Golpes/Cara	75		75		50		50	
Estabilidad (libras)	2200	----	1800	----	1200	----	1000	2400
Flujo (pulgada/100)	8	14	8	14	8	16	8	16
% de vacios en mezcla								
- Capa de Rodadura	3	5	3	5	3	5	3	5
- Capa Intermedia	3	8	3	8	3	8	3	8
- Capa de Base	3	9	3	9	3	9	3	9
% Vacios agregados	VER TABLA 405-5.5							
Relación filler/betún	0.8	1.2	0.8	1.2				
% Estabilidad retenida luego 7 días en agua temperatura ambiente								
- Capa de Rodadura	70	----	70	----				
- Intermedia o base	60	----	60	----				

Fuente: (MTO-001-F, 2002)

CAPITULO III

3. ENSAYOS DE LOS MATERIALES.

3.1. Ensayos de los materiales Pétreos

Para crear un diseño apropiado, es necesario identificar las propiedades y características mecánicas de los materiales, ya sea estos grueso y fino. Por ello, se han llevado a cabo los siguientes ensayos utilizando las normas nacionales (INEN) e internacionales (ASTM).

3.1.1. Equivalente de arena en el agregado fino (ASTM D2419-14)

Según la norma ASTM, este ensayo se utiliza para valorar la limpieza de los áridos basándose en las proporciones relativas de finos, polvo de arcilla o plásticos presentes en terrenos granulares y agregados finos que se someten al tamiz N.o 4 (4,75 mm). Esto tiene como objetivo describir el material que se empleará en la edificación de carreteras, dado que, a

mayor equivalente, mayor es la calidad del material. (International., 2019) Para calcular este valor se aplica la ecuación siguiente:

$$SE = \frac{SR}{CR} * 100 \quad (1)$$

Donde:

SE= Equivalente de arena

SR= Lectura de arena (material sedimentado)

CR= Lectura de finos como arcilla, limos, polvos (material suspendido)

Según las especificaciones de la normativa MTOP-001-F 2002, basada en la ASTM D4219, se establece que el equivalente de arena debe tener un valor mínimo del 35%. Sin embargo, si el material está destinado a ser utilizado en una capa de rodadura, deberá cumplir con requisitos más estrictos: un mínimo del 45% para tráfico liviano y mediano, y al menos un 50% para tráfico pesado (MTOP, 2002).

Ensayo Marshall: regulado por las normativas: ASTM D6927-15 y MOP-001F-2002 405. Se define como una prueba de laboratorio ampliamente utilizada para evaluar y determinar las propiedades de las mezclas asfálticas, particularmente su resistencia y estabilidad ante cargas repetidas y variaciones de temperatura. Dicho ensayo fue desarrollado por Francis H. Ray Marshall en la década de 1930 y como es bien sabido, tiene gran utilidad en el campo civil de la construcción de carreteras y pavimentos de calidad y alta durabilidad.

3.1.2. Gravedad específica y porcentaje de absorción del material pétreo

De acuerdo con las normativas ASTM C127 y C128, se determina simultáneamente la gravedad específica y el porcentaje de absorción de los áridos, tanto gruesos como finos. La gravedad específica se define como la relación entre la masa de un agregado y la masa de un

volumen de agua que equivale al volumen ocupado por las partículas del agregado (ASTM International, 2015). Este valor es crucial para evaluar el contenido de vacíos en una mezcla asfáltica caliente compactada, así como para determinar el volumen que el agregado puede ocupar en la producción de las mezclas. Por otro lado, la absorción se refiere al aumento de masa del material debido a la penetración de agua en los poros de las partículas durante un período de tiempo determinado. Este valor se obtiene a partir de la diferencia entre el peso de la muestra seca al horno y el peso de la muestra saturada con superficie seca (ASTM International, 2015).

3.1.2.1. Agregado grueso (ASTM C127-15)

Para el cálculo de la gravedad específica y porcentaje de absorción para el agregado grueso, la ASTM propone las siguientes fórmulas:

Ge: Gravedad específica Bulk.

$$Ge = \frac{A}{B - C} \quad (2)$$

Ges: Gravedad específica saturada con superficie seca.

$$Ges = \frac{B}{B - C} \quad (3)$$

Gea: Gravedad específica aparente.

$$Gea = \frac{A}{A - C} \quad (4)$$

%Abs: Porcentaje de absorción del agregado.

$$\%Abs = \frac{B - A}{A} * 100 \quad (5)$$

Donde:

A= masa de la muestra secada al horno, en gramos.

B= masa de la muestra saturada con superficie seca, en gramos.

C= masa de la muestra sumergida en agua, en gramos.

3.1.2.2. Agregado fino (ASTM C128-15)

De acuerdo con la normativa (International, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate., 2015), existen dos métodos establecidos para llevar a cabo el ensayo de los agregados finos: el uso de un picnómetro o el empleo del matraz de Le Chatelier. En el presente caso, se utilizó el método del picnómetro, el cual permite calcular tanto la gravedad específica como el porcentaje de absorción mediante el uso de fórmulas específicas. Este método garantiza resultados precisos y confiables en la caracterización de los agregados finos para evaluar su calidad y propiedades en aplicaciones de ingeniería.

Ge: Gravedad específica Bulk.

$$Ge = \frac{A}{B + S - C} \quad (6)$$

Ges: Gravedad específica saturada con superficie seca.

$$Ges = \frac{S}{B + S - C} \quad (7)$$

Gea: Gravedad específica aparente.

$$Gea = \frac{A}{B + A - C} \quad (8)$$

%Abs: Porcentaje de absorción del agregado.

$$\%Abs = \frac{S - A}{A} * 100 \quad (9)$$

3.1.3. Resistencia a los sulfatos de los agregados finos y gruesos (ASTM C88)

El ensayo descrito en la norma ASTM C88 permite evaluar la durabilidad de los agregados al someterlos a condiciones ambientales extremas, como ciclos de congelación y descongelación,

simulados en laboratorio. Este procedimiento consiste en sumergir los agregados en una solución de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, seguida de un secado en horno a una temperatura establecida en la normativa (International, Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, 2018)

Es importante señalar que los resultados obtenidos dependen del tipo de sulfato empleado. El uso de sulfato de magnesio provoca una reacción más agresiva en los agregados, por lo que el límite aceptable de pérdida es mayor (18%) en comparación con el sulfato de sodio, cuyo límite es del 12%. Para el presente estudio, se utilizó sulfato de magnesio como reactivo, debido a las características específicas de los materiales evaluados (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

3.1.4. Resistencia a la degradación del agregado grueso sometido a abrasión e impacto mediante la máquina de Los Ángeles (ASTM C131/131M-20)

La norma ASTM C131/131M-20 establece que este ensayo es aplicable a agregados con un tamaño máximo nominal de 1 ½" (37,5 mm). Para evaluar su resistencia a la abrasión e impacto, se utiliza la máquina de Los Ángeles, en la cual se incorpora una carga compuesta por esferas de acero con diámetros entre 46 y 48 mm y pesos que oscilan entre 390 y 445 gramos (International, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine., 2020)

El ensayo determina el porcentaje de desgaste del agregado al ser sometido a un contacto continuo entre sus partículas y las esferas de acero durante el proceso. Este porcentaje refleja la capacidad del agregado para resistir la abrasión, lo cual es esencial en aplicaciones como mezclas asfálticas, donde el material debe soportar la rodadura constante de vehículos sobre la carpeta asfáltica. Un menor porcentaje de desgaste indica una mejor calidad del agregado. Según las

características de la muestra, se ajustará la carga conforme a las tablas especificadas en la normativa.

Tabla 6 Especificaciones de carga para la máquina de Los Ángeles

Gradación	Número de esferas	Masa de la carga (g)
A	12	5 000 ± 25
B	11	4 584 ± 25
C	8	3 330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)

Tabla 7 Gradación de las muestras de ensayo

Tamaño de las aberturas de tamiz (mm) (aberturas cuadradas)		Masa por tamaños indicada (g)			
Pasante de	Retenido en	Gradación			
		A	B	C	D
37,5	25,0	1 250 ± 25	---	---	---
25,0	19,0	1 250 ± 25	---	---	---
19,0	12,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	---	---
12,5	9,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	---	---
9,5	6,3	---	---	2 500 ± 10	---
6,3	4,75	---	---	2 500 ± 10	---
4,75	2,36	---	---	---	5 000 ± 10
	Total	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)

Las especificaciones de la MTOP-001-F 2002 en función de la normativa ASTM C131 establecen que los agregados gruesos no deberán tener un desgaste mayor de 40% luego de 500 revoluciones de la máquina de Los Ángeles. (MTOP-001-F, 2002)

3.1.5. Tabla de resultados

La tabla de resumen presentada a continuación muestra los resultados obtenidos de los ensayos realizados en la planta asfáltica TEA. Estos valores son comparados y evaluados conforme a los rangos establecidos por las normativas vigentes, con el propósito de verificar si el

material cumple con las especificaciones mínimas y máximas requeridas. Esto asegura que el material posea las características necesarias para las prácticas técnicas que se llevarán a cabo.

Tabla 8 Gradación de las muestras de ensayo

Ensayos para determinar las propiedades de los materiales	MATERIALES					Normativas	Cumple		
	Unidades	CONCESIÓN MINERA PRIMA 2 SECTOR RIO GRALLABAMBA					SI	NO	
		1	2	3	4				
	Agregado Triturado Pasante 3/4"	Agregado Triturado Pasante 1/2"	Polvo de Piedra Triturado Pasante 3/16"	Arena Triturada Natural Lavada Pasante 1/4"					
Peso Unitario Suelto	(Ton/m3)	1,394	1,429	1,627	1,595	/			
Peso Unitario Varillado	(Ton/m3)	1,532	1,544	1,706	1,68	/			
Gravedad Específica Bulk	(Ton/m3)	2,528	2,453	2,335	2,413	ASTM C127			
Gravedad Específica SSS	(Ton/m3)	2,581	2,523	2,443	2,498	ASTM C127			
Gravedad Específica Aparente	(Ton/m3)	2,67	2,637	2,616	2,636	ASTM C127			
Absorción	(%)	2,1	2,84	4,6	3,52	ASTM C127			
Desgaste a la Abrasión	(%)	15,92	15,92	/	/	ASTM C131	X		Maximo 40 %
Desgaste por Acción de los Sulfatos	(%)	1,92	1,92	3,14	3,68	ASTM C88	X		Minimo 12%
Resistencia a la Peladura (Adherencia)	(%)	Mayor al 95%	Mayor al 95%	/	/	ASTM D3625			

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)

CAPITULO IV

4. ENSAYOS.

4.1. Diseño de la mezcla asfáltica en caliente según el método Marshall.

El diseño de mezcla asfáltica en caliente fue realizado mediante el Método Marshall, recomendado por el Instituto Norteamericano del Asfalto, en su Publicación MS-2; las exigencias y requerimientos técnicos que deben cumplir la mezcla asfáltica en caliente están constantes en las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes del MOP-001-F-2002. (MTOF-001-F, 2002)

4.1.1. Materiales componentes de la mezcla asfáltica.

El material bituminoso para la mezcla asfáltica en caliente es Cemento Asfáltico AC-20 producido en la Refinería de Esmeraldas.

Los Ensayos Categoría I: penetración, punto de ablandamiento, índice de penetración, punto de inflamación y densidad relativa.

Los agregados que se utilizaron para el diseño fueron obtenidos de la Concesión Minera Prima 2, Sector Río Guayllabamba:

- Agregado Triturado (VSI), Pasante malla ¾” y retenida ½”.
- Agregado Triturado (VSI), Pasante malla ½” y retenida 3/16”.
- Polvo de piedra triturado (VSI), Pasante malla 3/16”.
- Arena natural lavada, Pasante malla ¼”.

Datos Granulométricos de los Materiales que intervienen en la Mezcla y Granulometría:

Tabla 9 Resultados de Ensayos de Laboratorio de los Agregados que intervienen en el Diseño.

ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	MATERIALES				Tolerancias de los Ensayos
	CONCESION MINERA PRIMA 2, SECTOR RIO GUAYLLABAMBA				
	1	2	3	4	
	AGREGADO TRITURADO PASANTE ¾”	AGREGADO TRITURADO PASANTE ½”	POLVO DE PIEDRA TRITURADO PASANTE 3/16”	ARENA TRITURADA NATURAL LAVADA PASANTE ¼”	
PESO UNITARIO SUELTO (Ton/m ³)	1,394	1,429	1,627	1,595	
PESO UNITARIO VARILLADO (Ton/m ³)	1,532	1,544	1,706	1,680	
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK (Ton/m ³)	2,528	2,453	2,335	2,413	
GRAVEDAD ESPECIFICA SSS (Ton/m ³)	2,581	2,523	2,443	2,498	
GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE (Ton/m ³)	2,670	2,637	2,616	2,636	
ABSORCION (%)	2,10	2,84	4,60	3,52	
DESGASTE A LA ABRASION (%)	15,92	15,92			Máximo 40%
DESGASTE POR ACCION DE LOS SULFATOS (%)	1,92	1,92	3,14	3,68	Máximo 12 %
RESISTENCIA A LA PELADURA (ADHERENCIA) (%)	Mayor al 95 %	Mayor al 95 %			Adherencia del ligante con el agregado Mínimo 95%

Fuente: (CONASFALTO S.A.S, 2024)

Agregados Gruesos, Intermedios y Finos para el Diseño de Carpetas Asfálticas:

Tabla 10 Análisis Granulométrico de los Agregados.

No.	MATERIALES	%	MALLAS % QUE PASA							
			1"	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 50	N°200
1	AGREGADO TRITURADO PASANTE 3/4"	100	100	100	20	1	1	1	1	0
2	AGREGADO TRITURADO PASANTE 1/2"	100	100	100	100	83	23	3	2	1
3	POLVO DE PIEDRA TRITURADO PASANTE 3/16"	100	100	100	100	100	100	77	28	12
4	ARENA NATURAL LAVADA PASANTE 1/4"	100	100	100	100	100	98	75	25	6

Fuente: (CONASFALTO S.A.S, 2024)

Tabla 11 Combinación de porcentajes de Agregados para el Diseño.

No.	MATERIALES	%	MALLAS % QUE PASA							
			1"	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 50	N°200
1	AGREGADO TRITURADO PASANTE 3/4"	10	10	10	2	0	0	0	0	0
2	AGREGADO TRITURADO PASANTE 1/2"	35	35	35	35	29	8	1	1	0
3	POLVO DE PIEDRA TRITURADO PASANTE 3/16"	30	30	30	30	30	30	23	8	4
4	ARENA NATURAL LAVADA PASANTE 1/4"	25	25	25	25	25	25	19	6	2
	RESULTANTE	100		100	92		63	43	15	6
	ESPECIFICACION TABLA 405-5.1 (1/2") MOP 2002			100	90/100		44/74	28/58	5/21	2/10

Fuente: (CONASFALTO S.A.S, 2024)

4.1.2. Moldeo de Briquetas.

Con la Mezcla Resultante se confeccionaron 4 grupos de briquetas en juegos de 3, cada grupo contenía los agregados pétreos con los porcentajes indicados en el cuadro que antecede.

El cemento asfáltico AC-20, se adiciono en porcentajes variables entre 5,5 a 7,0 con incrementos de 0,5% para cada punto.

Los porcentajes de bitumen que se emplearon para el Moldeo de Briquetas fueron relacionados con la Formula Empírica que prepone el Instituto de Asfalto, para determinar el % de asfalto teórico de partida.

$$Pa = (0,035 * a) + (0,045 * b) + (K * c) + F \quad (10)$$

Donde:

Pa = Porcentaje optimo teórico de asfalto.

a = Porcentaje retenido en el tamiz N°8.

b = Porcentaje retenido entre el tamiz N°8 y N°200.

c = Porcentaje que pasa el tamiz N°200.

K = Según el porcentaje que pasa el tamiz N°200 (valor de c) toma los valores:

0,20 si el valor de c, esta entre 11 y 15%

0,18 si el valor de c, esta entre 6 y 10%

0,15 si el valor de c es 5% o menos

F = Esta en función de la absorción de los agregados y varía entre 0 y 2.

Para calcular el valor de F, se considera la absorción de cada agregado y el porcentaje de participación de la mezcla.

Cantidades y porcentajes para el moldeo de briquetas:

Tabla 12 Agregado gruesos y finos.

No.	MATERIALES	%	PESO DE MATERIALES EN GRAMOS			
			PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4
1	AGREGADO TRITURADO PASANTE 3/4"	10	600	600	600	600
	AGREGADO TRITURADO PASANTE 1/2"	35	2100	2100	2100	2100
3	POLVO DE PIEDRA TRITURADA PASANTE 3/16"	30	1800	1800	1800	1800
4	ARENA TRITURADA NATURAL LAVADA PASANTE 1/4"	25	1500	1500	1500	1500
	CEMENTO ASFALTICO (%)		5,5	6,0	6,5	7,0
	CEMENTO ASFALTICO PESO (gr)		349	383	417	452
	TOTAL AGREGADOS		6000	6000	6000	6000

Fuente: (CONASFALTO S.A.S, 2024)

4.2. Tráfico pesado (Criterio Marshall).

La muestra de la carpeta asfáltica será tomada de la muestra preparada de acuerdo con la fórmula maestra de obra y sometida a los ensayos según el Método Marshall.

4.2.1. Capas de rodadura (Carpeta Asfáltica 1/2”).

La carpeta asfáltica en caliente (producida en planta) cumple con las especificaciones técnicas, que constan en el Manual del MOP edición 2002; se estima que por estas vías y calles circulara tráfico pesado.

Tabla 13 Especificaciones técnicas que deben cumplir las mezclas asfálticas en caliente.

DESCRIPCION	MINIMO	MAXIMO
Nº DE GOLPES POR CARA	75	
ESTABILIDAD (LIBRAS)	1800	
FLUJO (PULG. / 100)	8	14
% DE VACIOS EN LA MEZCLA (Vv)	3	5
VACIOS DE AGREGADO MINERAL (VAM)	≥13	
VACIOS RELLENOS DE ASFALTO (VFA)	65	75
RELACION FILLER – BETUN	0,8	1,2
% DE ESTABILIDAD RETENIDA LUEGO DE 7 DIAS EN AGUA A TEMP. AMBIENTE	70	

Fuente: (CONASFALTO S.A.S, 2024)

Formula de trabajo de la planta asfáltica.

Tabla 14 Datos para planta asfáltica.

FORMULA DE TRABAJO (DATOS PLANTA ASFÁLTICA)
Agregado Triturado Pasante malla 3/4” = 9,39%
Agregado Triturado Pasante malla 1/2” = 32,86%
Polvo de piedra pasante malla 3/16” = 28,17%
Arena natural lavada = 23,48%
Cemento Asfáltico AC-20 = 6,1%
TOTAL = 100%

Fuente: (CONASFALTO S.A.S, 2024)

4.2.2. Propiedades de la mezcla asfáltica obtenidas con 6,1% de cemento asfaltico (AC-20).

Tabla 15 Propiedades de la mezcla asfáltica.

% ÓPTIMO CEMENTO ASFÁLTICO	6,1
DENSIDAD BULK (Kg/m3)	2,232
ESTABILIDAD (lb)	3295
FLUJO (1/100")	12
VACIOS MEZCLA TOTAL (%)	4,0
VACIOS RELLENOS CON BETÓN (%)	69,0
VACIOS EN LOS ÁRIDOS (VAM %)	13,20

Fuente: (CONASFALTO S.A.S, 2024)

4.2.2.1. Granulometría.

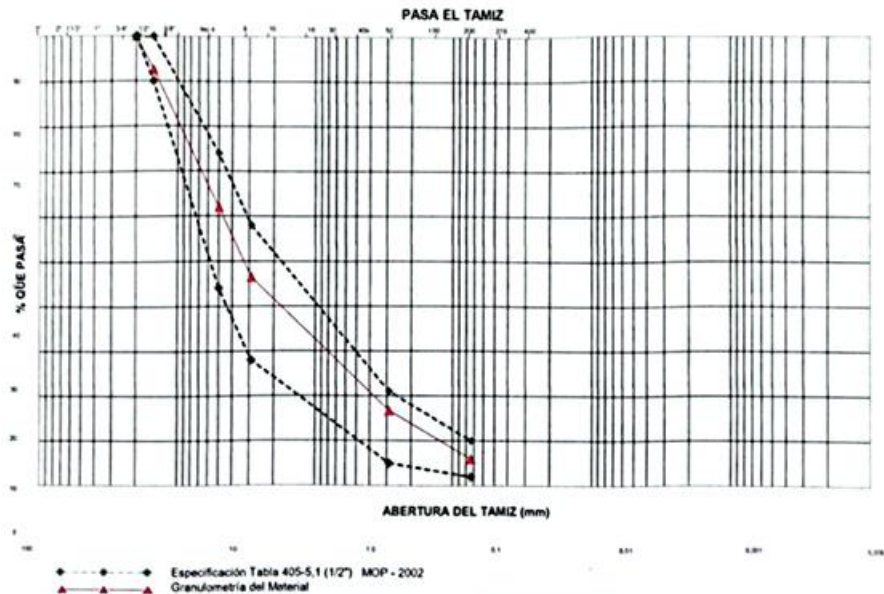
Tabla 16 Curva Granulometría Marshall.

GRANULOMETRÍA																					
TAMIZ No	3"	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	Asa No.	8	10	16	30	40	60	80	100	200	Pasa No 200	
Peso Reten. Parcial gr																					
Peso Reten. Acumulado gr						0	336		1710		203					591				731	
% Retenido						0	7		38		16					45				50	
% Que pasa						100	93		62		46					17				6	
% Especific.						100	90-100		44-74		28-58					5-21				2-10	

PESO TOTAL MUESTRA = 4500 gr
 Peso total antes de lavado = 809 g
 Peso total después de lavado = 731 g
 Peso perdido por lavado y terrizado = 78 g

DIAGRAMA GRANULOMETRICO

M.I.T CLASIFICACION	Arena			Limo			Arcilla		
	Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina



Fuente: (CONASFALTO S.A.S, 2024)

4.3. Propiedades de mezcla asfáltica.

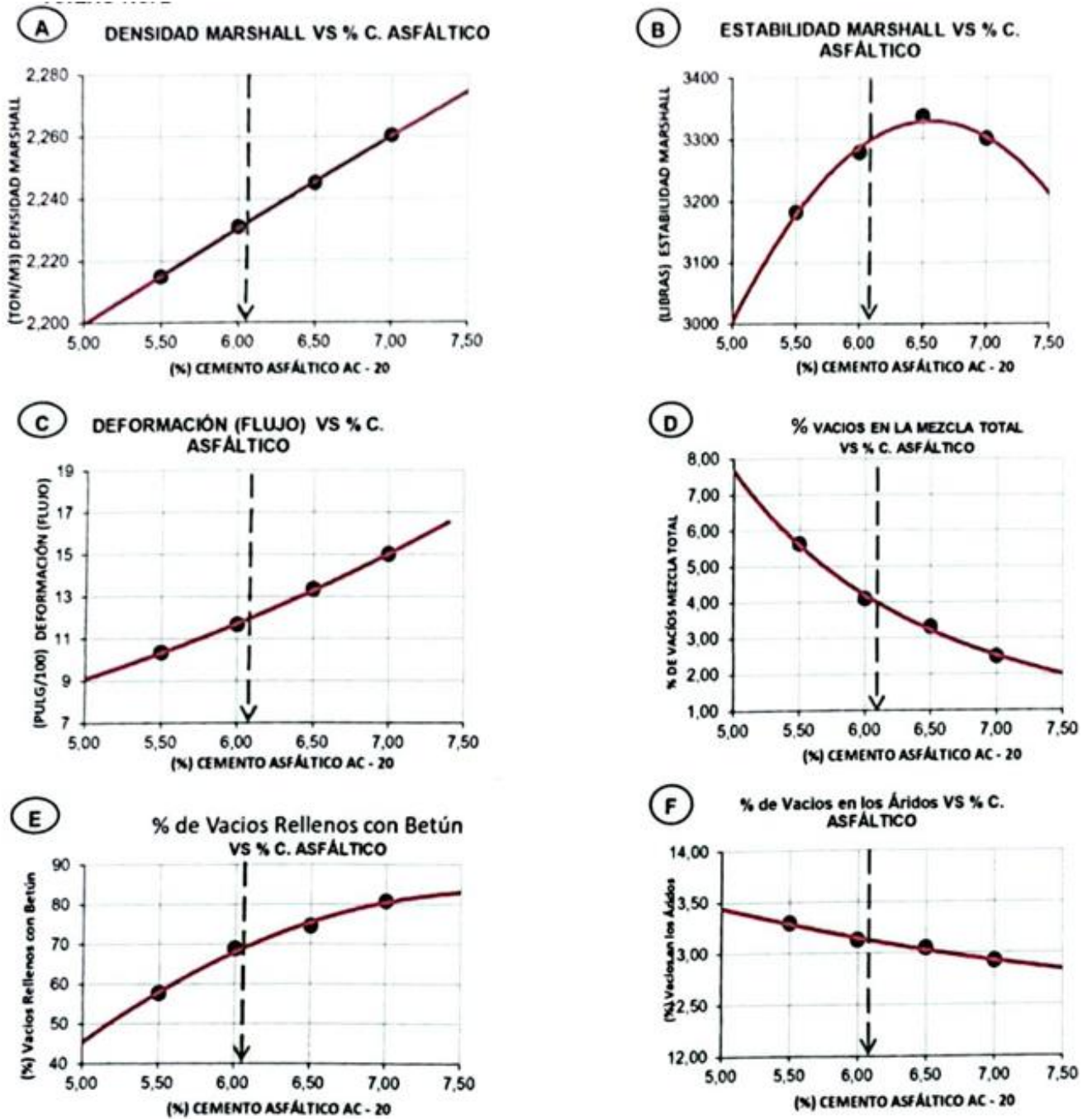
Tabla 17 Estabilidad corregida – Diseño Marshall.

BRIQUETA NO.	% C. A. Pa	FACTOR CORREC.	PESO BRIQUETAS (gramos)			VOL. cm3	GRAV. ESPECIFICAS		VOLUMEN % DEL TOTAL			MAX. TEOR. Gmm'	% V.A.M. VMA	%Asf. Abs. Paa	% V.L.L.A. VFA	% AEFEC Pae	ESTABILIDAD (Lbs.)		FLUJO 1/100"
			Aire	Saturado	Agua		Gmb	Gmm	VA	Vv	Vae						Medida	Correg.	
1	5.50	1.04	1112.0	1109.0	606.0	503.0	2.211										330	3258	11
2		1.04	1105.0	1108.0	610.0	496.0	2.219										300	2964	10
3		1.00	1132.0	1135.0	624.0	511.0	2.215											350	3321
PROMEDIO							2.218	2.347	86.71	5.63	7.67	2.243	13.29	0.21	57.67	6.30		3181	10
4	6.00	1.04	1127.0	1129.0	622.0	507.0	2.223										310	3062	12
5		1.04	1137.0	1139.0	631.0	508.0	2.238										340	3356	12
6		1.00	1136.0	1138.0	629.0	506.0	2.232										360	3414	11
PROMEDIO							2.231	2.326	86.87	4.08	9.04	2.228	13.13	0.19	68.88	6.82		3278	12
7	6.50	0.96	1187.0	1186.0	658.0	530.0	2.240										370	3368	14
8		0.89	1232.0	1233.0	685.0	548.0	2.248										390	3289	13
9		0.93	1227.0	1228.0	662.0	546.0	2.247										380	3350	13
PROMEDIO							2.245	2.322	86.95	3.32	9.73	2.214	13.05	0.21	74.89	6.30		3336	13
10	7.00	1.00	1160.0	1161.0	649.0	512.0	2.256										350	3321	15
11		1.04	1135.0	1136.0	633.0	503.0	2.256										320	3160	14
12		1.00	1166.0	1169.0	652.0	517.0	2.259										360	3414	16
PROMEDIO							2.260	2.318	87.08	2.48	10.43	2.200	12.92	0.25	80.77	6.77		3298	15

Fuente: (CONASFALTO S.A.S, 2024)

4.3.1. Carpeta asfáltica en caliente ½”.

Ilustración 3 Granulometría ½” MOP-F2002.



DENSIDAD BULK = 2,232 TON/M3
 ESTABILIDAD = 3295 LIBRAS
 FLUJO = 12,0 1/100"

VACIOS = 4,00%
 VFA = 69,0%
 VMA = 13,20 %

ASFALTO DISEÑO = 6,1%

Fuente: (CONASFALTO S.A.S, 2024)

4.4. Elaboración de briquetas.

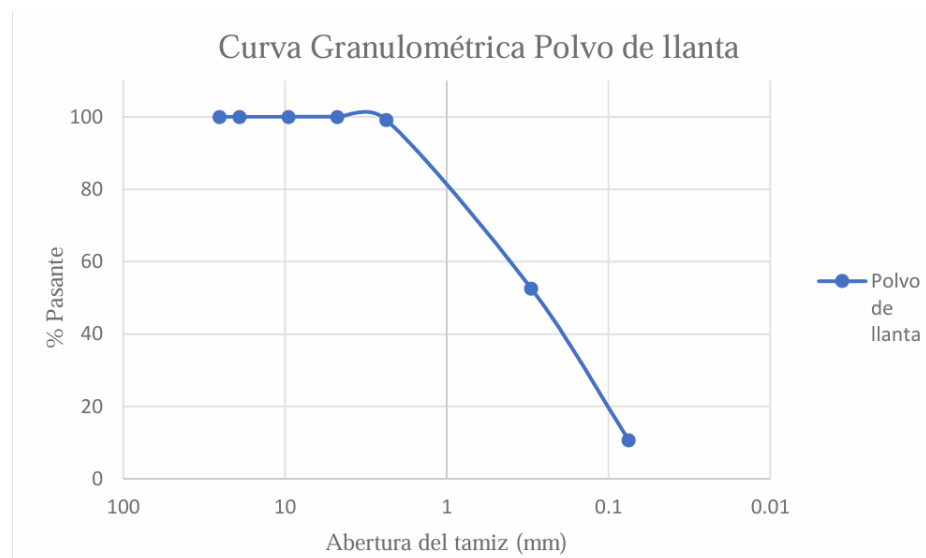
Para la elaboración de las briquetas, según lo establecido en la MOP 2002, el peso puede variar entre 900 gramos y 1 100 gramos. En este contexto, se realizaron 36 briquetas en la planta asfáltica TEA utilizando la mezcla del diseño previamente desarrollado por CONSASFALTO S.A.S. esta mezcla se le incorporó 1.5% de neumático (polvo de llanta de avión), según la curva granulométrica de polvo de llanta de avión del trabajo de integración curricular de Espinoza David y Guayaquil Carolina.

Ilustración 4 Mezcla asfáltica.



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

Ilustración 5 Tabla de % ideal de neumático.



Fuente: (David Espinoza, Carolina Guayaquil, 2023)

Ilustración 6 Neumático (polvo de llanta de avión)



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

4.4.1. Compactación de las briquetas.

Paso 1.

Colocar el molde caliente sobre la mesa de trabajo y cubrir la superficie de la base del molde con papel parafinado o papel filtro. Verter la mezcla recién preparada en el molde a la temperatura adecuada, asegurando una distribución uniforme y evitando la segregación de materiales. Utilizar una espátula para distribuir la mezcla dentro del molde, dando a la superficie una forma redondeada al final. (Yanez, 2018)

Paso 2.

Trasladar el molde con la mezcla a la base de compactación. Aplicar 50 golpes con el martillo de compactación, asegurándose de que el eje del martillo se mantenga lo más perpendicular posible a la base del molde para garantizar una compactación uniforme. (Yanez, 2018)

Paso 3.

Una vez compactada la primera cara de la briqueta, desmontar el collar del molde, invertir el molde con la briqueta, volver a colocar el collar y aplicar nuevamente 50 golpes en la segunda cara. (Yanez, 2018)

Paso 4.

Al finalizar la compactación, retirar la placa base del molde y dejar enfriar la briqueta completamente. Es importante asegurarse de que la briqueta esté lo suficientemente fría para evitar deformaciones al extraerla del molde. (Yanez, 2018)

Paso 5.

Extraer la briqueta del molde utilizando un extractor de muestras (gato hidráulico) y colocarla cuidadosamente sobre una superficie plana para su manejo posterior. (Yanez, 2018)

Ilustración 7 Martillo compactador eléctrico.



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

Ilustración 8 Gato hidráulico.



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

Ilustración 9 Briquetas.



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

4.5. Ensayo Marshall.

En el Método Marshall, se somete a cada briqueta compactada a los siguientes ensayos y análisis:

4.5.1. Determinación del Peso Específico "BULK" (densidad aparente).

La determinación del peso específico "BULK" o densidad aparente de probetas de mezcla asfáltica en caliente es un paso crucial en el control de calidad y diseño de mezclas asfálticas. Este ensayo nos permite evaluar la compactación y las propiedades volumétricas esenciales para garantizar el desempeño de los pavimentos.

La densidad aparente se utiliza en el cálculo de varios parámetros, como el contenido de vacíos en la mezcla (porosidad), que son cruciales para la durabilidad y el rendimiento del pavimento.

Según la normativa ASTM D2726, la gravedad específica Bulk de una mezcla compactada es la relación entre la masa de un volumen dado del material a 25 °C y la masa de un volumen igual de agua a la misma temperatura. (ASTM International, 2021)

4.5.2. Ensayo de Estabilidad y Flujo.

Ensayo de pérdida de estabilidad por inmersión: es un procedimiento empleado en la ingeniería vial cuyo propósito es evaluar la resistencia de las mezclas asfálticas después de haber sido sumergidas en agua, con el objetivo de analizar los efectos que la acción del agua provoca sobre el material. Este ensayo simula condiciones de humedad, permitiendo identificar cómo la mezcla se ve afectada por el contacto prolongado con el agua, un factor determinante en la durabilidad y el desempeño de los pavimentos bajo condiciones ambientales adversas.

Las briquetas se someten a un proceso de doble acondicionamiento térmico, primero a 60°C ± 1°C durante 22 horas y luego a 25°C ± 1°C por 2 horas; luego, las briquetas se retiran,

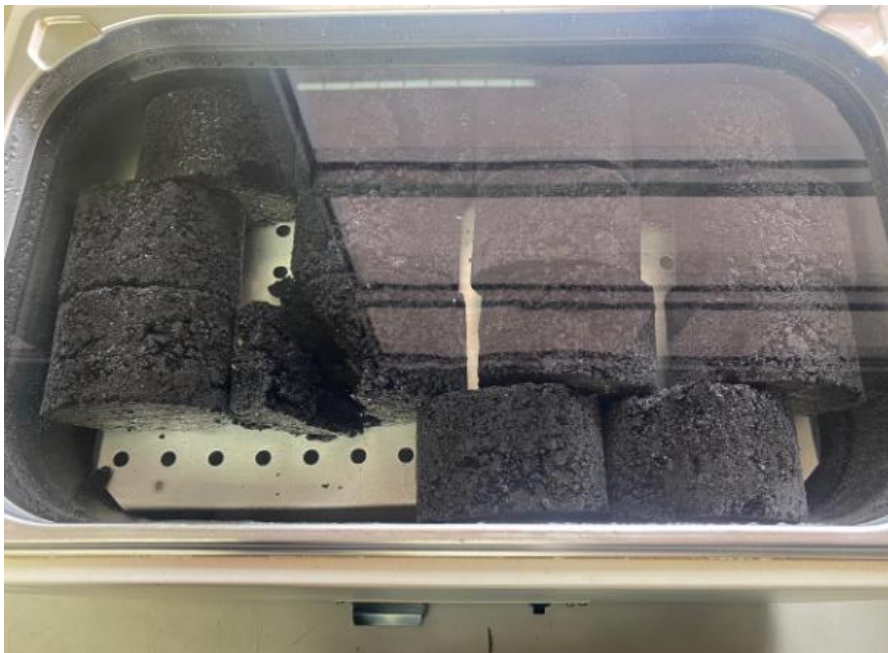
se secan y se colocan en anillo de la prensa Marshall, a la que se aplica una carga controlada y mide la deformación y flujo de las probetas, generando la gráfica de la curva de estabilidad vs flujo en una escala de 5k o 10 k. (ASTM D1075-96, 2005)

Ilustración 10 Briquetas durante las 22 horas a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

Ilustración 11 Briquetas a $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ sumergidas durante 2 horas.



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

El valor de estabilidad Marshall corresponde a la carga máxima, medida en libras, a la

que la briqueta falla. Por su parte, el flujo representa la deformación de la briqueta, expresada en centésimas de pulgada, que resulta de la disminución de su diámetro vertical. La interpretación de estos valores es crucial para garantizar el desempeño del pavimento:

4.5.2.1. Estabilidad.

Este parámetro mide la capacidad de la mezcla para resistir cargas antes de fallar. Si bien se asocia a mayor resistencia, valores extremadamente altos pueden resultar en pavimentos rígidos y menos durables, susceptibles a fisuras bajo cargas dinámicas. (ASTM D1075-96, 2005) (Páramo & Poncino, 2012)

Para determinar el valor de estabilidad de las briquetas del ensayo que no cumplan el rango de comprendido entre 6.35 ± 0.32 cm, es importante multiplicar por el factor de corrección. (Yanez, 2018)

Tabla 18 Corrección de los valores de estabilidad.

CORRECCION DE LOS VALORES DE ESTABILIDAD		
VOLUMEN DE LA BRIQUETA EN CM³	ESPESES APROXIMADO DE LA BRIQUETA EN CM	FACTOR DE CORRECCION
200 – 213	2.54	5.56
214 – 225	2.70	5.00
226 – 237	2.86	4.55
238 – 250	3.02	4.17
251 – 264	3.17	3.85
265 – 276	3.33	3.57
277 – 289	3.49	3.33
290 – 301	3.65	3.03
302 – 316	3.81	2.78
317 – 328	3.97	2.50
329 – 340	4.13	2.27
341 – 353	4.29	2.08
354 – 367	4.44	1.92
368 – 379	4.60	1.79
380 – 392	4.76	1.67

380 – 392	4.76	1.67
393 – 405	4.92	1.56
406 – 420	5.08	1.47
421 – 431	5.24	1.39
432 – 443	5.40	1.32
444 – 456	5.56	1.25
457 – 470	5.71	1.19
471 – 482	5.87	1.14
483 – 495	6.03	1.09
496 – 508	6.19	1.04
509 – 522	6.35	1.00
523 – 535	6.51	0.96

Fuente: (Yanez, 2018)

4.5.2.2. Fluencia.

Mide la deformación de la mezcla bajo carga. Mezclas con alta estabilidad y baja fluencia son rígidas y frágiles, mientras que aquellas con baja estabilidad y alta fluencia tienden a ser plásticas, presentando deformaciones significativas bajo el tránsito vehicular. (Páramo & Poncino, 2012)

Ilustración 12 Ensayo de Estabilidad y Flujo (Prensa Marshall).



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

De acuerdo con las especificaciones técnicas de la MTOP-001-F (2002), para tráfico muy pesado, el valor mínimo de estabilidad es de 2200 libras, mientras que para tráfico pesado es de 1800 libras. El flujo debe mantenerse entre 8 y 14 centésimas de pulgada para ambos casos. (MTOP-001-F, 2002)

4.6. Ensayos complementarios.

Este ensayo es crucial para la evaluación de la durabilidad de la mezcla asfáltica, ya que las fallas en la adherencia entre el asfalto y los agregados pueden llevar a problemas graves como el desprendimiento del asfalto, la formación de baches y la degradación prematura del pavimento. Además, proporciona una medición directa de la resistencia del pavimento a la humedad, lo que es vital en regiones con condiciones climáticas lluviosas o húmedas.

4.6.1. Ensayo Rice (Determinación de la Densidad y Análisis de Vacíos).

Regulado por las normativas: ASTM D2041 y AASHTO T209. Se define como la determinación de la gravedad específica máxima teórica para mezclas asfálticas a una temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Después de finalizar el ensayo de Estabilidad y Flujo, se procede a realizar un análisis de la densidad y los vacíos para cada serie de briquetas, siguiendo los siguientes pasos:

4.6.1.1. Preparación de la muestra.

La mezcla asfáltica que analizara debe ser representativa de la mezcla del pavimento que se está evaluando. La muestra debe ser cuidadosamente extraída de la briqueta, asegurando que esté libre de contaminantes o materiales extraños. La muestra se debe secar completamente antes de ser utilizada para el ensayo, a fin de evitar la presencia de humedad que pueda alterar los resultados. (AASHTO, 2020)

Ilustración 13 Muestra seca en el horno



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

4.6.1.2. Determinación del peso de la muestra.

Una vez que la muestra se encuentra seca, se pesa cuidadosamente para determinar su peso inicial. Este valor es importante para el cálculo de la gravedad específica máxima, que se basará en la masa de la mezcla y su volumen desplazado.

Ilustración 14 Peso de la muestra



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

4.6.1.3. Medición del volumen del desplazamiento.

El ensayo de RICE se lleva a cabo utilizando un cilindro de desplazamiento de agua. Se sumerge la muestra de la mezcla asfáltica completamente en agua a una temperatura controlada, generalmente entre 23°C y 25°C. La muestra debe estar completamente saturada de agua, lo que elimina las burbujas de aire presentes en los poros de la mezcla, garantizando que el volumen medido sea el volumen total de la mezcla sin interferencias. (ASTM, 2017)

Ilustración 15 Ensayo Rice



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

Ilustración 16 Ensayo Rice



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

4.6.2. Ensayo de Peladura.

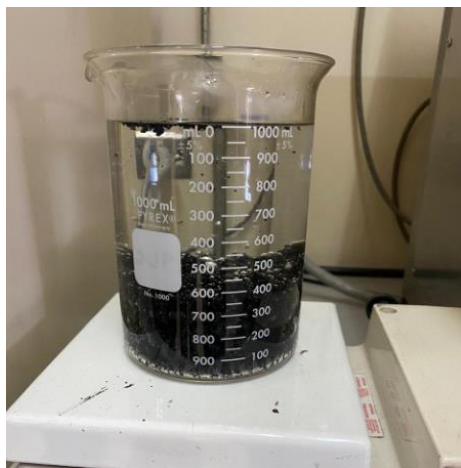
Regulado por las normativas: ASTM D1664 y AASHTO T182. Se define como el

procedimiento para determinar el porcentaje de desprendimiento de la capa bituminosa en la superficie el agregado en presencia de agua. Para que el asfalto se considere óptimo, el porcentaje de desprendimiento del bitumen no debe exceder el 5% del peso ensayado.

Las muestras de mezcla asfáltica se sumergen completamente en agua a una temperatura controlada (generalmente a 60°C) durante un período de 15 minutos. Este proceso simula la exposición de los pavimentos a condiciones de humedad (especialmente lluvia) durante su vida útil. (Huang, 2019)

La duración y la temperatura de la inmersión pueden variar dependiendo de las especificaciones del ensayo, pero generalmente buscan replicar las condiciones más severas que pueden ocurrir en el campo.

Ilustración 17 Muestra asfáltica sumergida a 60°C



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

Después, se observa el grado de separación o peladura que ocurre entre el asfalto y los agregados. Este análisis se realiza visualmente y a menudo se cuantifica mediante la medición del área de la superficie de los agregados expuesta. (Huang, 2019)

Cuanto mayor sea el área de peladura, menor será la calidad de la mezcla asfáltica, ya que indica que la adherencia entre el asfalto y los agregados no es suficiente para soportar las condiciones de humedad y carga.

Ilustración 18 Análisis manual visual ensayo Peladura



Fuente: (Mosquera & Pachacama,2024).

CAPITULO V

5. CÁLCULOS Y RESULTADOS.

En el presente capítulo se detallará el desarrollo de los cálculos correspondientes a los ensayos Marshall realizados sobre la briqueta número 4. Este procedimiento constituye una parte fundamental para evaluar las propiedades mecánicas y de durabilidad del material asfáltico empleado. Se incluirán los cálculos típicos de parámetros esenciales, como el peso específico de la briqueta, la estabilidad, el flujo y la resistencia a la peladura. Estos parámetros permiten determinar la calidad del material según las especificaciones técnicas vigentes, garantizando su desempeño óptimo bajo las condiciones de servicio previstas.

El ensayo Marshall es de gran importancia en el diseño de mezclas asfálticas, ya que proporciona información clave sobre la resistencia y deformabilidad del pavimento, asegurando su capacidad para soportar las cargas del tráfico vehicular. En este capítulo, se aplicarán los procedimientos normativos establecidos y las respectivas fórmulas para cada uno de los

cálculos, proporcionando un análisis detallado que permitirá verificar la adecuación de la mezcla asfáltica utilizada para la construcción vial.

Con este enfoque, se busca contribuir a la formación de un criterio técnico sólido y alineado con los estándares de calidad exigidos en la ingeniería civil ecuatoriana, promoviendo obras de infraestructura duraderas y seguras para el desarrollo del país.

5.1. Diseño de mezclas asfálticas según Método Marshall

En una mezcla asfáltica en caliente, tanto el agregado pétreo como el asfalto deben combinarse en proporciones precisas para evaluar sus propiedades físicas y determinar su comportamiento una vez conformado el pavimento finalizado. Entre los métodos más empleados para definir las proporciones adecuadas de estos materiales, el método Marshall destaca como el más reconocido a nivel mundial.

El propósito principal del método Marshall es establecer el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. Además, proporciona datos valiosos sobre las propiedades de la mezcla, como densidades y contenidos de vacíos que deben ajustarse a los rangos adecuados para la construcción de pavimentos de calidad. (Asphalt Institute, 1992)

Cabe señalar que este método es aplicable exclusivamente a mezclas asfálticas en caliente con un tamaño máximo nominal de agregado de 25 mm (1 pulgada) o menor. Su uso es válido tanto para diseño en laboratorio como para control de calidad en campo. Las briquetas utilizadas en el ensayo presentan dimensiones estandarizadas de 63,5 mm de espesor y 101,6 mm de diámetro (equivalente a 2,5 y 4 pulgadas, respectivamente), empleando la misma combinación de agregados, pero con diferentes contenidos de asfalto. Los parámetros más relevantes obtenidos mediante este método incluyen la relación entre vacíos y densidad, así como la resistencia a la estabilidad y el flujo de las muestras compactadas. (Asphalt Institute, 2014)

5.2. Cálculos

Se realizará un ejemplo práctico de la briqueta #4, mostrando todo el cálculo correspondiente al método Marshall.

Datos de la briqueta # 4:

Espesor = 67.83 mm
Diámetro = 102.92 mm
% asfalto = 6.1
Peso sumergido en aire = 1108.65 gr
Peso saturado con superficie seca = 1118 gr
Peso sumergido en agua = 582.75 gr
Peso específico máximo medido (Gmm) = 2.345 gr/cm ³

5.2.1. Volumen de briqueta:

Formula:

$$V = W_{ss} - W_w \quad (11)$$

W_{ss} = Peso saturado con superficie seca.

W_w = Peso sumergido en el agua.

Solución:

$$V = 1118 - 582.75$$

$$V = 535.2 \text{ cm}^3$$

5.2.2. Peso Especifico Bulk:

Formula:

$$Gb = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w} \quad (12)$$

W_{ss} = Peso saturado con superficie seca.

W_w = Peso sumergido en el agua.

W_a = Peso seco en aire

Solución:

$$Gb = \frac{1108.75}{1118 - 582.75}$$

$$Gb = 2.071 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

5.2.3. Vacíos con aire:

Formula:

$$Va = \left(1 - \frac{Gb}{Gmm}\right) * 100 \quad (13)$$

Gb = Peso específico Bulk.

Gmm = Peso específico máximo medido.

Solución:

$$Va = \left(1 - \frac{2.071}{23.45}\right) * 100$$
$$Va = 11.70 \%$$

5.2.4. Porcentaje en volumen del agregado vs volumen total

Formula:

$$Vagre = \frac{Ps * G_b}{G_{sb}} \quad (14)$$

En donde:

Ps = Porcentaje de agregado en la mezcla

Gb = Gravedad específica Bulk

Gsb = Gravedad específica Bulk del agregado total

Solución:

$$Vagre = \frac{Ps * G_b}{G_{sb}}$$

$$Vagre = \frac{(100 - 6.10) * 2.071}{2.414}$$

$$Vagre = 80.6 \%$$

5.2.5. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral se definen como los espacios intergranulares que se encuentran entre los agregados. Estos espacios pueden contener tanto aire como el asfalto que recubre los agregados. Para determinar el volumen de estos vacíos, se debe sumar el volumen de aire presente al volumen de asfalto efectivo en la muestra, y posteriormente dividir esta suma por el volumen total de la mezcla. Aunque este cálculo se realiza comúnmente utilizando la gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada, también es fundamental considerar el porcentaje total de agregado en la mezcla y la gravedad específica seca de los agregados,

expresándose siempre en términos porcentuales. El cálculo del porcentaje de vacíos en el agregado mineral se lleva a cabo mediante una fórmula específica que integra estos elementos.

Formula:

$$VAM = 100 - V_{agre} \quad (15)$$

Ec. Vacíos en el agregado mineral

VMA= Porcentaje de vacíos entre los agregados en la mezcla compactada.

Ps= Porcentaje de agregado presente en la mezcla.

Gmb= Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica compactada.

Gsb= Gravedad específica de la mezcla de agregados.

Solución:

$$VAM = 100 - V_{agre}$$

$$VAM = 100 - 80.6$$

$$VAM = 19.4 \%$$

5.2.6. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VAF)

Este porcentaje desempeña un papel fundamental, ya que representa la fracción efectiva de asfalto presente en la mezcla, la cual forma parte del porcentaje de vacíos en el agregado mineral. Asimismo, dicho porcentaje tiende a incrementarse conforme la mezcla se estabiliza y compacta, debido a que los espacios entre los agregados se ven mejor distribuidos a medida que estos son recubiertos por el asfalto, lo que provoca una disminución en los vacíos de aire.

El cálculo de este valor puede realizarse empleando el volumen efectivo de asfalto, que excluye el asfalto absorbido por los agregados, junto con el volumen de vacíos de aire.

Alternativamente, se puede determinar mediante la relación entre la diferencia del porcentaje de vacíos en los agregados y el porcentaje de vacíos de aire, con respecto al porcentaje total de vacíos en los agregados. (Asphalt Institute, 2014)

Formula:

$$VAF = \frac{(VAM - Vv)}{VAM} * 100 \quad (16)$$

En donde:

VAM = Vacíos en el agregado mineral

Vv = Porcentaje de vacíos con aire

Solución:

$$VAF = \frac{(VAM - Vv)}{VAM} * 100$$

$$VAF = \frac{(19.4 - 11.7)}{19.4} * 100$$

$$VAF = 39.92 \%$$

5.2.7. Estabilidad y flujo

El ensayo que se realizó tiene como finalidad la determinación de la pérdida de estabilidad y cohesión por acción del agua sobre la interfase ligante - agregado, de mezclas asfálticas sometidas a inmersión y a condiciones de tráfico pesado mediante ensayos de tracción por compresión diametral, con los equipos correspondientes al método Marshall. (Páramo & Poncino, 2012)

La pérdida de estabilidad es una medida porcentual que relaciona cual es la diferencia de capacidad de carga entre probetas sometidas al ensayo de estabilidad tanto en condiciones secas como de inmersión. (Páramo & Poncino, 2012)

$$\% \text{ Perdida de Estabilidad} = \frac{Es}{Em} * 100 \quad (17)$$

En donde:

Es = Estabilidad Marshall Saturado

Em = Estabilidad Marshall Seco

5.2.8. Ensayo de peladura

Cálculo del Porcentaje de Peladura: Para obtener los resultados finales, se calcula el porcentaje de la superficie de la muestra que ha experimentado peladura. Este valor se compara con los límites establecidos por las normas técnicas (ASTM D3625 o AASHTO T 283). Si el porcentaje de peladura es alto, esto indica que la mezcla tiene una baja resistencia al agua, lo que podría comprometer su durabilidad y desempeño a largo plazo (ASTM, 2017).

$$\% \text{ de peladura} = \frac{W_p}{W_t} * 100 \quad (18)$$

En donde:

W_p = Peso del agregado sin material bituminoso

W_t = Peso total de la muestra

5.3. Resultados.

5.3.1. Ensayos marshall para muestras en condiciones normales

De acuerdo con la normativa AASHTO T-245, el procedimiento de los ensayos Marshall para muestras en condiciones normales comienza con la inmersión de las 18 briquetas previamente seleccionadas en un baño de agua a 60 °C durante 30 minutos. Cabe destacar la importancia de organizar las briquetas según su grupo o familia, siguiendo un orden específico para asegurar la consistencia en el proceso, tal como se indicó previamente.

Ilustración 19 Colocación de briquetas en baño María



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

Ensayos Marshall para muestras saturadas

Los ensayos Marshall para las briquetas sometidas a inmersión consistieron en sumergir las muestras seleccionadas en agua a una temperatura de 60 °C durante un período de 22 horas. Posteriormente, se trasladaron a un baño de agua a 25 °C por 2 horas adicionales, completando

así un tiempo total de acondicionamiento de 24 horas en baño maría.

Ilustración 20 Briquetas luego de permanecer 22 horas en baño María



Fuente: (Mosquera & Pachacama, 2024)

Finalmente, se aplica el mismo procedimiento y recomendaciones de ensayo en la prensa Marshall que las briquetas ensayadas en condiciones normales, es decir, no dejar pasar más de 1 minuto entre el momento en donde se retira la briqueta del baño maría hasta la finalización del ensayo.

Ilustración 21 Cálculos del ensayo Marshall para muestras en estado seco y saturado.

		ENSAYO MARSHALL															INGRESAR			INGRESAR						
		GSB (Peso específico de agregado) = 2,414 g/cm ³																								
		Gmm (Peso esp. Teórico máx. medida) = 2,345 g/cm ³																								
Fecha de realización	Estado	Uso	Peso RICE	Espesor (mm)	Diámetro (mm)	Briqueta No.	Porcentaje de Adulterio	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seco	Peso en agua	Volumen Briqueta (cm ³)	D. Bulk g/cm ³	Gmm g/cm ³	V. a. %	V. a. g. %	VAM %	VAF %	INGRESAR			Flujo 0.01"					
																		Medida	F Correc.	Corregida						
26/07/2024	SATURADO		66,66	102,76	2	43,0	1882	1105,31	57418	531,1	2,075	2,345	13,5	80,7	19,3	40,28	2400,00	0,96	32,64	24,58						
	SATURADO		67,85	102,92	4	43,0	1108,75	1118,07	58375	533,3	2,071	2,345	13,7	80,6	19,4	39,92	3100,00	0,96	297,6	27,00						
	SATURADO		67,23	102,25	6	43,0	1157,11	1121,8	57974	542,1	2,061	2,345	12,1	80,2	19,8	38,91	3300,00	0,93	304,9	33,58						
	SATURADO		68,11	102,87	7	43,0	1148,25	1118,09	59921	520,4	2,091	2,345	10,1	82,1	17,9	43,97	3600,00	0,96	345,6	25,00						
	SATURADO		64,82	102,53	10	43,0	1113,36	1114,48	59472	519,8	2,133	2,345	9,8	81,2	18,8	47,60	4350,00	1,00	415,0	25,00						
	SATURADO	INGROMIENTO		66,72	102,96	11	43,0	1102,69	1107,04	57416	530,9	2,077	2,345	13,4	80,0	19,2	40,21	2950,00	0,96	284,0	28,00					
	PROMEDIO SATURADO															2,0819	2,345	10,929	81,254	18,746	41,805				32,93	2,5
	SECO			71,53	102,64	2	43,0	1109,83	1118,3	57109	547,2	2,028	2,345	13,5	78,9	21,1	35,98	2450,00	0,89	218,1	18,50					
	SECO			70,87	103,5	3	43,0	1113,51	1123,16	56594	557,2	1,998	2,345	14,8	77,7	22,3	33,61	2400,00	0,89	233,6	19,00					
	SECO	RICE 1	2220,69	68,93	102,15	5	43,0	1105,67	1117,05	56077	596,9	1,985	2,345	15,3	77,2	22,8	32,66	2300,00	0,89	204,7	22,50					
	SECO	RICE 1	2220,69	70,96	102,31	8	43,0	1115,02	1122,26	57882	543,4	2,052	2,345	12,5	79,8	20,2	38,86	3050,00	0,93	339,5	19,00					
	SECO	PREADURA		68,21	102,86	9	43,0	1111,75	1120	5712	540,2	2,028	2,345	13,5	78,9	21,1	35,97	2900,00	0,89	258,1	21,50					
SECO			61,12	102,56	12	43,0	1014,38	1028,57	52398	494,5	2,051	2,345	12,5	79,8	20,2	38,88	2600,00	1,00	283,4	18,50						
PROMEDIO SECO															2,024	2,345	13,689	78,737	21,263	35,714				252,9	2,0	
26/07/2024	SATURADO	INGROMIENTO	66,78	102,74	15	43,0	1110,72	1119,08	57009	549,0	2,025	2,345	13,6	78,8	21,2	35,72	2190,00	0,89	194,9	30,00						
	SATURADO	INGROMIENTO	66,98	102,15	18	43,0	1101,85	1122,81	57472	548,1	2,032	2,345	13,3	78,1	20,9	36,23	2650,00	0,89	382,5	32,58						
	SATURADO	RICE 3	2220,66	71,57	102,48	20	43,0	1109,1	1124,84	56808	565,2	1,962	2,345	16,3	76,3	23,7	31,96	2200,00	0,96	389,2	34,00					
	SATURADO	RICE 3	2220,66	68,14	102,68	21	43,0	1136,88	1124,13	56198	552,2	2,037	2,345	13,1	79,3	20,7	36,76	3075,00	0,89							
	SATURADO	RICE 6	2226,15	68,49	102,43	23	43,0	1110,33	1122,14	57442	548,7	2,025	2,345	13,6	78,8	21,2	35,75	1950,00	0,89	173,6	32,00					
	SATURADO			71,09	102,21	24	43,0	1115,73	1128,06	5702	539,8	1,997	2,345	14,8	77,7	22,3	31,49	3075,00	0,89							
	PROMEDIO SATURADO															2,013	2,345	14,143	78,823	21,177	38,851				187,0	3,2
	SECO	RICE 2	2227	66,51	102,71	13	43,0	1118,05	1123,25	58497	536,3	2,096	2,345	11,8	81,2	18,8	41,42	1350,00	0,93	125,6	17,00					
	SECO			68,15	102,91	14	43,0	1114,24	1123,01	5809	542,1	2,056	2,345	12,3	80,0	20,0	38,48	1000,00	0,93	93,0	16,00					
	SECO	RICE 2	2227	64,52	102,57	16	43,0	1108,25	1110,59	59687	513,7	2,157	2,345	9,8	83,9	16,1	50,27	1850,00	1,00	385,8	18,50					
	SECO	PREADURA		65,63	102,78	17	43,0	1113,37	1115,96	59119	524,8	2,122	2,345	9,5	82,5	17,5	45,48	1650,00	0,96	158,4	21,50					
	SECO			64,77	102,51	19	43,0	1111,38	1116,09	57881	517,3	2,099	2,345	11,8	80,5	19,5	39,65	1375,00	0,93	127,9	20,00					
SECO			74,88	102,72	22	43,0	1111,32	1113,09	59523	517,9	2,146	2,345	8,5	83,5	16,5	48,65	2250,00	1,00	225,0	21,00						
PROMEDIO SECO															2,104	2,345	10,185	81,933	18,067	43,994				152,5	1,9	

20/07/2024	SATURADO		05,95	109,48	29	630	1119,95	1115,3	599,24	516,1	2,333	2,345	8,1	8,10	16,2	49,07	2250,00	1,00	2250	27,00	
	SATURADO		05,52	109,08	29	630	1116,1	1115,51	599	516,5	2,161	2,345	7,8	8,41	15,9	50,76	2300,00	1,00	2300	33,00	
	SATURADO	RICE 1	2226,01	06,07	109,79	30	630	1125,04	1120,25	601,45	518,8	2,151	2,345	8,3	8,17	16,3	49,32	2400,00	1,00	2400	35,50
	SATURADO	RICE 2	2226,01	06,08	109,05	33	630	1120,17	1116,59	604,14	512,5	2,166	2,345	7,6	8,43	15,7	51,59	2050,00	1,00	2050	28,00
	SATURADO	PELADURA		06,58	109,79	34	630	1127,75	1122,16	606,18	516,0	2,157	2,345	8,0	8,19	16,1	50,14	2000,00	1,00	2000	23,00
	SATURADO	RICE 6	2226,15	05,25	109,53	35	630	1128,02	1117,07	607,1	518,4	2,183	2,345	6,9	8,49	15,1	54,29	2000,00	1,00	2000	19,70
	PROMEDIO SATURADO										2,162	2,345	7,990	84,118	15,882	50,998				2448	2,6
	SECO	RICE 4	2229,57	09,05	109,09	25	630	1113,07	1119,61	591,47	528,1	2,109	2,345	10,1	8,21	17,0	41,88	1700,00	0,96	1632	16,00
	SECO			06,68	106,5	26	630	1111,25	1116,8	599,38	527,4	2,107	2,345	10,1	8,20	16,0	41,74	1800,00	0,96	1728	16,50
	SECO	RICE 4	2229,57	09,08	109,13	27	630	1115,7	1120,47	579,75	540,7	2,033	2,345	11,3	7,91	20,9	36,42	1950,00	0,89	185	17,50
	SECO			06,08	109,58	31	630	1113,81	1120,17	592,83	527,3	2,111	2,345	10,0	8,21	17,0	44,25	1500,00	0,96	1440	15,50
	SECO			07,18	109,88	32	630	1115,06	1121,75	587,59	534,2	2,087	2,345	11,0	8,12	16,0	41,59	1350,00	0,96	1296	16,00
	SECO			05,12	109,93	35	630	1116,16	1120,73	592,23	521,3	2,132	2,345	9,1	8,29	17,1	40,88	2100,00	0,96	2016	19,00
	PROMEDIO SECO										2,097	2,345	10,580	81,572	16,428	42,796				1508	1,7

Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

5.3.2. Ensayos complementarios (rice, peladura)

5.3.2.1. Ensayo RICE

En el ensayo RICE, se colocó una muestra disgregada en un horno para eliminar completamente la humedad durante toda la noche. Al finalizar este proceso, se comprobó que la muestra estuviera completamente suelta y, tras enfriarse por un breve período, se pesaron al menos 2000 gramos de mezcla asfáltica, los cuales se colocaron en el recipiente correspondiente. Posteriormente, se llenó el recipiente con agua a una temperatura de 25 °C, asegurando que la mezcla quedara completamente cubierta, con un excedente de aproximadamente una pulgada de agua.

Es importante mencionar que, a lo largo del procedimiento, se comprobó que durante el primer minuto los valores de presión dentro del recipiente se mantuvieran estabilizados entre 30 y 25 mmHg.

Ilustración 22 Preparación de muestra para ensayo RICE



Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

Después de retirar los seguros, el recipiente se trasladó al baño maría a una temperatura de 25 °C, sumergiendo lentamente la muestra para evitar la formación de burbujas de agua en cualquier momento. Una vez que el recipiente estuvo completamente sumergido y se verificó esta condición, se colocó la tapa y se mantuvo el conjunto en el baño maría durante un periodo de 5 minutos. Al finalizar el tiempo en baño maría, se retiró el recipiente del agua y se secó cuidadosamente.

Tabla 19 Resultados ensayo RICE 4 en condición seca

ID MUESTRA:	RICE 4	SECO
INFORMACIÓN GENERAL		
# Muestras	25 y 27	
REGISTROS DE LA MUESTRA		
Masa muestra seca en aire (gr)	2210,90	1,740
Masa de contenedor y tapa con agua (gr)	7419,40	
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua (gr)	8689,90	
RICE (GMM)	2,351	
%VACIOS		
VAM		
VAF		

Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

Tabla 20 Resultados ensayo RICE 2 en condición seca

ID MUESTRA:	RICE 2	SECO
INFORMACIÓN GENERAL		
# Muestras	13 y 16	
REGISTROS DE LA MUESTRA		
Masa muestra seca en aire (gr)	2207,50	1,756
Masa de contenedor y tapa con agua (gr)	7419,40	
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua (gr)	8676,50	
RICE (GMM)	2,323	
%VACIOS		
VAM		
VAF		

Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

Tabla 21 Resultados ensayo RICE 1 en condición seca

ID MUESTRA:	RICE 1	SECO
INFORMACIÓN GENERAL		
# Muestras	8 y 5	
REGISTROS DE LA MUESTRA		
Masa muestra seca en aire (gr)	2211,00	1,743
Masa de contenedor y tapa con agua (gr)	7419,40	
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua (gr)	8687,70	
RICE (GMM)	2,345	PROMEDIO 2,340
%VACIOS		
VAM		
VAF		

Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

Tabla 22 Resultados ensayo RICE 1 en condición saturada

ID MUESTRA:	RICE 3	SATURADO
INFORMACIÓN GENERAL		
# Muestras	20 y 21	
REGISTROS DE LA MUESTRA		
Masa muestra seca en aire (gr)	2211,60	1,748
Masa de contenedor y tapa con agua (gr)	7419,40	
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua (gr)	8684,40	
RICE (GMM)	2,336	
%VACIOS		
VAM		
VAF		

Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

Tabla 23 Resultados ensayo RICE 6 en condición saturada

ID MUESTRA:	RICE 6	SATURADO
INFORMACIÓN GENERAL		
# Muestras	23 y 35	
REGISTROS DE LA MUESTRA		
Masa muestra seca en aire (gr)	2200,60	1,743
Masa de contenedor y tapa con agua (gr)	7419,40	
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua (gr)	8682,20	
RICE (GMM)	2,347	
%VACIOS		
VAM		
VAF		

Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

Tabla 24 Resultados ensayo RICE 1 en condición saturada

ID MUESTRA:	RICE 5	SATURADO
INFORMACIÓN GENERAL		
# Muestras	30 y 33	
REGISTROS DE LA MUESTRA		
Masa muestra seca en aire (gr)	2219,50	1,732
Masa de contenedor y tapa con agua (gr)	7419,40	
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua (gr)	8701,10	
RICE (GMM)	2,367	PROMEDIO 2,350
%VACIOS		
VAM		
VAF		PROMEDIO 2,345

Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

5.3.2.2. Ensayo peladura

Para las briquetas seleccionadas para el ensayo, se desintegró completamente cada una, y posteriormente se pesaron aproximadamente 250 g de la mezcla asfáltica disgregada. Se preparó un recipiente con agua, que se llevó a ebullición, y una vez alcanzado el punto de ebullición, se sumergió la muestra en el agua manteniéndola bajo calor durante 10 minutos.

Al finalizar este tiempo, el recipiente se retiró del fuego y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Una vez la muestra estuvo lo suficientemente fría, se eliminó el agua y se realizó una inspección visual para identificar los agregados que mostraban signos de peladura.

Concluido el análisis, se separaron los agregados afectados y se volvió a pesar la muestra. Finalmente, el porcentaje de peladura fue calculado utilizando la ecuación (18).

Ilustración 23 Análisis manual visual ensayo Peladura



Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

CAPITULO VI

6. ANÁLISIS Y COMPARACIONES.

6.1. Análisis de briquetas en condiciones secas.

Para el análisis de las briquetas ensayadas en condiciones secas, se tomaron en cuenta las briquetas 2,3 y 5, donde se presentan los valores obtenidos:

Tabla 25 Análisis de un conjunto de 3 briquetas en condiciones seca

ANÁLISIS DE BRIQUETAS EN CONDICIONES SECAS								
Fecha de realización	N° Briqueta	Estado	Estabilidad Promedio (lb)	Flujo Promedio	Relación Filler/Asfalto	% Vacíos con Aire (Va)	%Vacíos Agregado Mineral (VAM)	%Vacíos Relleno de Asfalto (VAF)
24/07/20224	2	Seco	2383.33	20.33	0.987	14.53	22.07	34.08
	3	Seco						
	5	Seco						

Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

Tabla 26 Rangos de comparación con los valores obtenidos de las briquetas secas

PARÁMETROS	RANGOS DE VALORES	VALORES OBTENIDOS SECO	UNIDADES
Estabilidad	>1800	2383.33	lb
Flujo	8. -14	20.33	in/100
Filler/Asfalto	0,8- 14	0.987	/
(Va)	3% - 5%	14.53	%
VAM	≥ 13%	22.07	%
VAF	65% - 75%	34.08	%

Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

Los valores de estabilidad indica un valor de resistencia a la deformación, en donde a medida que el valor aumenta, el pavimento se hace muy rígido, lo que produce la durabilidad de la mezcla asfáltica que se ve afectada. En este caso, las briquetas 2,3 y 4 tienen un valor mayor a 1800, indica que tiene la suficiente rigidez en la mezcla para resistir cargas de tráfico pesado.

El flujo indica la deformación de la briqueta sin embargo tiene como consecuencia la disminución de su diámetro vertical. En la briqueta al tener un valor de 20.33 in/100 y cumplir con los parámetros establecidos para un pavimento de tráfico pesado, indica que la mezcla asfáltica es frágil y rígida, por lo cual se puede concluir que la capacidad y deformación referente a carga vehicular no es idónea.

La relación filler/asfalto de todas las briquetas de análisis presenta un valor de 0.987, por lo cual se puede concluir que la proporción de asfalto en la mezcla cumplen con los parámetros mencionados en la normativa MOP 2002-001-F referente a mezclas de alto tráfico.

El porcentaje de vacíos con aire (Va), nos indica la capacidad de fluencia frente al paso

de tráfico que al obtener 3% la fluencia de la mezcla asfáltica sería limitado, mientras que al obtener el 5% la mezcla se vuelve muy plástica frente a las cargas que se les vaya a aplicar. En las briquetas ensayadas al tener un promedio de 14.53% indica que la muestra no presenta la suficiente fluencia para deformarse frente a cargas vehiculares.

El porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM), nos indica que tan estable, dúctil y resistencia a la fatiga puede tener una mezcla asfáltica, sabiendo que si tiene valores menores a la normativa MOP 2002-001-F la rigidez aumenta, en el agrietamiento sucederá con mayor facilidad y la y la fatiga en la mezcla asfáltica será mayor. En las briquetas ensayadas al tener un promedio de 22.07% indica que posee un equilibrio en cuestiones de estabilidad, fatiga y resistencia al paso del tráfico vehicular.

El porcentaje de vacíos relleno de asfalto (VAF), nos indica la cantidad de vacíos que el ligante asfáltico protege dentro de la mezcla asfáltica, indicando que si tiene valores menores al mínimo requerido por la normativa MOP 2002-001-F la mezcla es muy rígida, sin embargo, si supera el valor máximo establecido tiende a ser una mezcla muy dúctil. En las briquetas ensayadas al tener un promedio de 34.08% indica que no se encuentra en entre los límites permisivos.

6.2. Análisis de briquetas en condiciones saturadas.

Para el análisis de las briquetas ensayadas en condiciones saturadas, se tomaron en cuenta las briquetas 1,6 y 7, donde se presentan los valores obtenidos:

Tabla 27 Análisis de un conjunto de 3 briquetas en condiciones saturadas

ANÁLISIS DE BRIQUETAS EN CONDICIONES SATURADAS								
Fecha de realización	N° Briqueta	Estado	Estabilidad Promedio	Flujo Promedio	Relación Filler/Asfalto	% Vacíos con Aire (Va)	%Vacíos Agregado Mineral (VAM)	%Vacíos Relleno de Asfalto (VAF)
24/07/20224	1	SATURADO	3433.33	23.67	0.987	11.23	19.02	41.06
	6	SATURADO						
	7	SATURADO						

Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

Tabla 28 Rangos de comparación con los valores obtenidos de las briquetas saturadas

PARÁMETROS	RANGOS DE VALORES	VALORES OBTENIDOS SATURADO	UNIDADES
Estabilidad	>1800	3433.33	lb
Flujo	8. -14	23.67	in/100
Filler/Asfalto	0,8- 14	0.987	/
(Va)	6.5% - 7.5%	11.23	%
VAM	≥ 13%	19.02	%
VAF	65% - 75%	41.06	%

Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

Los valores de estabilidad y flujo obtenidos en las briquetas 1,6 y 7 de análisis, la estabilidad aumentaron mientras que los valores de flujo también aumentaron sin embargo mirando el análisis de briquetas en condiciones secas las briquetas se volvieron muy rígidas esto nos indica que los valores de estabilidad y flujo son muy altos por lo cual la mezcla asfáltica va a tener problemas en ductilidad, fatiga y capacidad de soportar cargas vehiculares, adaptando a la mezcla asfáltica rígida lo cual su vida útil se vería afectada,

La relación filler/asfalto de todas las briquetas de análisis presenta un valor de 0.987, por lo cual se puede concluir que la proporción de asfalto en la mezcla cumplen con los parámetros mencionados en la normativa MOP 2002-001-F referente a mezclas de alto tráfico.

El porcentaje de vacíos con aire (Va) obtenidos en las briquetas 1,6 y 7 de análisis, es del 11.23% indica que la muestra está fuera del rango de muestras saturadas.

El porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM) obtenidos en las briquetas 1,6 y 7 de análisis, disminuye con relación al análisis de briquetas en superficie seca, lo cual se obtiene el valor de 19.02% en el análisis de briquetas en superficie saturada, esto puede ser debido al neumático (polvo de llanta) y que la presión hidráulica generada sobre la briketa durante el proceso de inmersión se desplazó el ligante asfáltico hacia los bordes.

El porcentaje de vacíos relleno de asfalto (VAF) obtenidos en las briquetas 1,6 y 7 de análisis, aumenta con relación al análisis de briquetas en superficie seca, lo cual se obtiene el

valor de 41.06% en el análisis de briquetas en superficie saturada, esto puede ser debido al neumático (polvo de llanta) agregado en la mezcla asfáltica ya que la presión hidráulica generada sobre las briquetas durante el proceso de inmersión se provocó una reestructuración en los agregados, sin embargo esto provocando por la dilatación/expansión (hinchazón) de los agregados producido por acción de la infiltración del agua.

6.3. Comparación de resultados de briquetas ensayadas en condiciones secas y en condiciones saturadas.

Tabla 29 Comparación de resultados de briquetas

PARÁMETROS	ENSAYO EN CONDICIONES SECAS	ENSAYO EN CONDICIONES SATURADAS	UNIDADES
Estabilidad	2383.33	3433.33	lb
Flujo	20.33	23.67	in/100
Filler/Asfalto	0.99	0.987	/
(Va)	14.53	11.23	%
VAM	22.07	19.02	%
VAF	34.08	41.06	%

Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

Los datos de estabilidad y flujo muestran una clara diferencia entre las briquetas sometidas a condiciones secas y las evaluadas bajo condiciones saturadas. La estabilidad aumenta significativamente de 2383.33 lb a 3433.33 lb cuando las muestras son ensayadas en condiciones saturadas, lo que indica una mayor resistencia a las cargas aplicadas tras la absorción de agua. Este comportamiento puede atribuirse al endurecimiento del ligante y la menor flexibilidad, lo que podría resultar en una disminución de la vida útil del pavimento debido a una mayor susceptibilidad a las fisuras.

En cuanto al flujo, el aumento observado de 20.33 in/100 a 23.67 in/100 bajo condiciones saturadas señala un incremento en la deformación plástica antes del colapso de la muestra. Si bien un flujo mayor sugiere cierta capacidad de deformación, puede implicar también una menor resistencia al agrietamiento y fatiga.

El valor de la relación filler/asfalto es prácticamente constante, con una ligera disminución de 0.99 a 0.987, lo que sugiere que la proporción de finos y ligante asfáltico permanece dentro de los límites adecuados, asegurando una mezcla balanceada conforme a las especificaciones técnicas.

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) y el porcentaje de vacíos con aire (Va) presentan diferencias significativas. En las briquetas ensayadas en condiciones saturadas, el VAM disminuye de 22.07% a 19.02%, lo que implica una compactación más efectiva de los agregados debido a la infiltración de agua. Asimismo, el Va se reduce de 14.53% a 11.23%, reflejando una menor porosidad de la mezcla y, por tanto, una mayor densidad. Este efecto podría tener un impacto positivo en la durabilidad del pavimento, pero a costa de una menor capacidad de disipar las tensiones inducidas por el tráfico.

Finalmente, el porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VAF) aumenta de 34.08% a 41.06%, lo que evidencia una mayor saturación de la mezcla bajo condiciones de inmersión. Este aumento es indicativo de un mejor recubrimiento de los agregados, pero también puede comprometer la estabilidad a largo plazo, especialmente en zonas con alta incidencia de precipitaciones.

En conclusión, los resultados del ensayo bajo condiciones saturadas revelan cambios significativos en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica. Si bien algunos parámetros mejoran la resistencia inmediata, otros podrían afectar negativamente la vida útil del pavimento flexible, subrayando la importancia de considerar estos factores en el diseño y mantenimiento de carreteras sometidas a condiciones ambientales adversas.

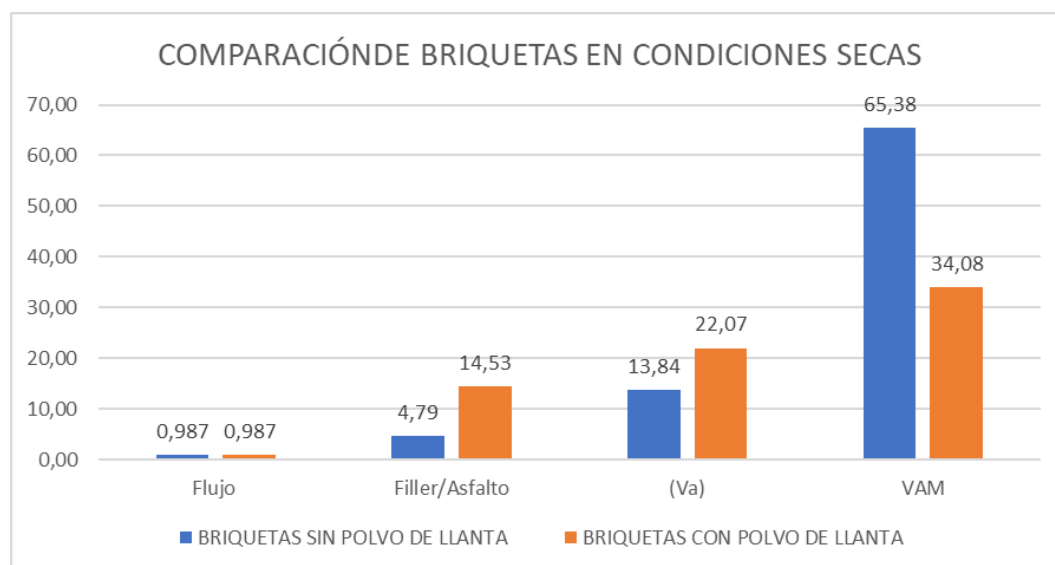
6.4. Comparación de resultados, briquetas con polvo de llanta de avión y briquetas sin polvo de llanta de avión.

Tabla 30 Comparación de briquetas secas con y sin polvo de llantas de avión

ENSAYO DE BRIQUETAS EN CONDICIONES SECAS			
PARÁMETROS	BRIQUETAS SIN POLVO DE LLANTA	BRIQUETAS CON POLVO DE LLANTA	UNIDADES
Estabilidad	2334.80	2383.33	lb
Flujo	13.40	20.33	in/100
Filler/Asfalto	0.987	0.987	/
(Va)	4.79	14.53	%
VAM	13.84	22.07	%
VAF	65.38	34.08	%

Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

Ilustración 24 Comparación de briquetas con y sin polvo de llanta secas



Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

Los valores de estabilidad para las briquetas sin polvo de llanta (2334.80 lb) y con polvo de llanta (2383.33 lb) muestran un comportamiento cercano, con un leve incremento en las muestras que incluyen polvo de llanta. Esto sugiere que la incorporación del polvo de llanta no afecta negativamente la resistencia de las briquetas al tráfico pesado. De hecho, el ligero aumento puede ser atribuido a las propiedades del material reciclado, que podría proporcionar mayor cohesión en la mezcla, aunque no de forma significativamente superior. Este parámetro indica que ambas alternativas cumplen con las especificaciones mínimas requeridas para soportar cargas.

En cuanto al flujo, se observa un valor de 13.40 in/100 para las briquetas sin polvo de llanta y 20.33 in/100 para aquellas que lo contienen. El aumento en el flujo en las muestras con

polvo de llanta puede interpretarse como un indicio de mayor ductilidad o deformación frente a las cargas aplicadas. Esto podría ser un efecto directo de la naturaleza elástica del polvo de llanta, aunque también puede representar un comportamiento menos favorable en términos de rigidez de la mezcla, particularmente bajo condiciones de carga repetitiva.

Análisis del porcentaje de vacíos en el agregado mineral (Va), el porcentaje de vacíos en el agregado mineral muestra un contraste considerable entre ambas muestras, con 4.79 % para las briquetas sin polvo de llanta y 14.53 % para aquellas con polvo de llanta. Este incremento significativo en las briquetas con polvo de llanta podría implicar una compactación menos efectiva o una estructura interna más porosa. Aunque el Va aún podría ser aceptable dentro de ciertos límites normativos, este resultado indica que el diseño de la mezcla con polvo de llanta debe ser ajustado para mejorar la densidad y reducir la susceptibilidad a la infiltración de agua.

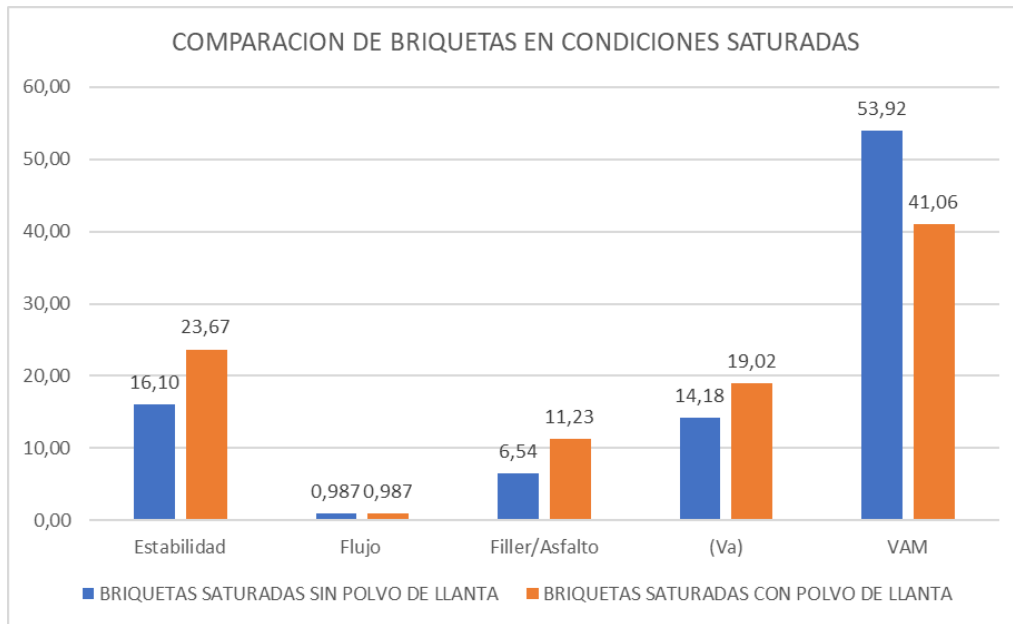
Análisis del porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VAF), finalmente, los valores de VAF reflejan un comportamiento opuesto, con 65.38 % para las briquetas sin polvo de llanta y 34.08 % para aquellas que lo contienen. Este descenso notable en las muestras con polvo de llanta sugiere una menor proporción de vacíos efectivamente llenados por el asfalto, lo que puede comprometer la durabilidad y la impermeabilidad de la mezcla. Este comportamiento podría atribuirse a la interacción limitada entre el polvo de llanta y el ligante asfáltico, destacando la necesidad de optimizar las proporciones de los componentes en la mezcla.

Tabla 31 Comparación de briquetas saturadas con y sin polvo de llantas de avión

ENSAYO DE BRIQUETAS EN CONDICIONES SATURADAS			
PARÁMETROS	BRIQUETAS SIN POLVO DE LLANTA	BRIQUETAS CON POLVO DE LLANTA	UNIDADES
Estabilidad	5561,33	3433,33	lb
Flujo	16,10	23,67	in/100
Filler/Asfalto	0,987	0,987	/
(Va)	6,54	11,23	%
VAM	14,18	19,02	%
VAF	53,92	41,06	%

Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

Ilustración 25 Comparación de briquetas con y sin polvo de llanta saturadas



Fuente (Mosquera & Pachacama,2024).

La estabilidad presenta un valor significativamente mayor en las briquetas sin polvo de llanta (5561.33 lb) en comparación con las que contienen polvo de llanta (3433.33 lb). Esto indica que, en condiciones saturadas, las briquetas sin polvo de llanta ofrecen una resistencia considerablemente superior a las cargas aplicadas. La disminución observada en las briquetas con polvo de llanta puede deberse a las características físicas del material reciclado, que podría afectar negativamente la cohesión de la mezcla bajo condiciones de saturación.

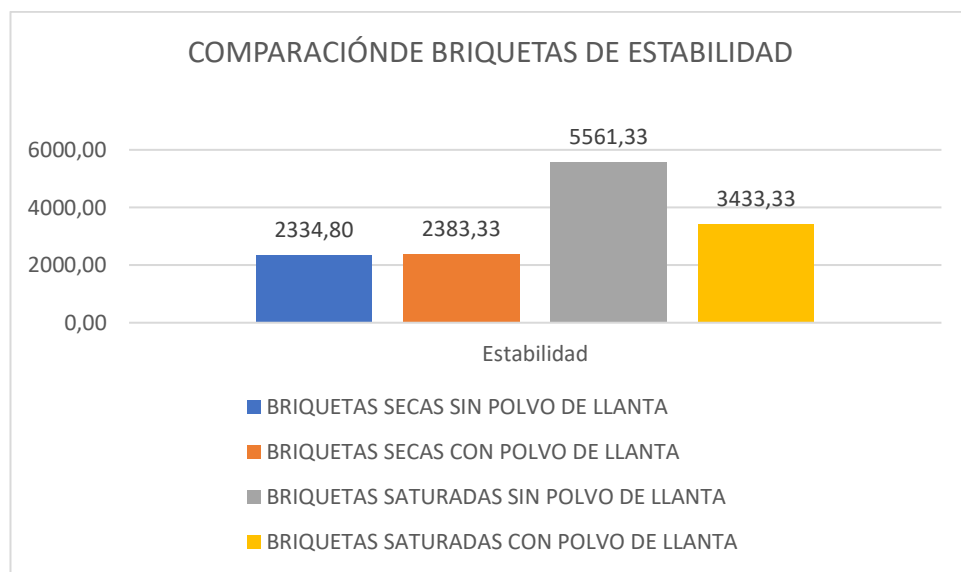
El flujo presenta un comportamiento diferente en ambas muestras, con 16.10 in/100 para las briquetas sin polvo de llanta y 23.67 in/100 para las briquetas con polvo de llanta. Este aumento en las muestras con polvo de llanta refleja una mayor capacidad de deformación, lo que puede interpretarse como una pérdida de rigidez en la mezcla. Aunque un mayor flujo podría ser indicativo de ductilidad, también puede comprometer la resistencia al tráfico repetitivo, particularmente en condiciones de humedad.

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (Va) es de 6.54 % en las briquetas sin polvo de llanta, mientras que en las briquetas con polvo de llanta aumenta a 11.23 %. Este incremento significativo en las muestras con polvo de llanta podría sugerir una compactación

menos eficiente o una estructura interna más porosa, lo cual podría afectar negativamente la durabilidad de la mezcla frente a la exposición al agua y a las cargas dinámicas.

En cuanto al porcentaje de vacíos llenos de asfalto, las briquetas sin polvo de llanta presentan un valor de 53.92 %, mientras que las briquetas con polvo de llanta alcanzan un 41.06 %. Este descenso indica que una menor proporción de los vacíos está siendo ocupada por el ligante en las briquetas con polvo de llanta, lo que podría comprometer su impermeabilidad y resistencia a la acción de agentes externos como el agua. Este resultado pone de manifiesto la necesidad de ajustes en la mezcla para mejorar la interacción entre el polvo de llanta y el ligante.

Ilustración 26 Comparación de la estabilidad briquetas con y sin polvo de llanta secas y saturadas



Fuente (Mosquera & Pachacama, 2024).

CAPITULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones.

- Las briquetas con polvo de llanta de avión mostraron un comportamiento diferenciado en términos de estabilidad y flujo en comparación con las briquetas convencionales (sin

polvo de llanta de avión). En condiciones secas, las mezclas cumplieron con los valores normativos mínimos de estabilidad, demostrando resistencia adecuada para soportar tráfico pesado. Sin embargo, en condiciones saturadas, se evidenció una pérdida significativa de estabilidad, lo que indica la necesidad de optimizar la proporción de polvo de llanta en la mezcla, la adición de polvo de llanta mejoró la resistencia a la peladura y la estabilidad bajo condiciones de lluvia, según los ensayos Marshall y Rice. Se recomienda explorar su aplicación en pavimentos urbanos para mejorar la sostenibilidad y eficiencia económica.

- El flujo observado en las briquetas con polvo de llanta fue superior a los rangos establecidos por la normativa MOP 2002-001-F, lo que sugiere una disminución en la rigidez de la mezcla y una mayor capacidad de deformación bajo cargas de alto tráfico vehicular. Aunque esta propiedad podría ser de gran ventaja en términos de absorción de energía, también representa un posible compromiso en términos de durabilidad y resistencia al paso de los vehículos y altas temperaturas.
- El porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VAF) es menor en las mezclas con polvo de llanta, lo que indica una menor interacción entre el ligante y los agregados. Este comportamiento puede comprometer la impermeabilidad de la mezcla y aumentar su vulnerabilidad a la acción del agua, especialmente bajo condiciones climáticas críticas, como el porcentaje con polvo de llanta de avión es mayor tanto como en condiciones secas y saturadas las briquetas ensayadas tienen el fenómeno de hinchamiento provocado por el alto porcentaje de vacíos.
- Los resultados del ensayo de peladura muestran una adhesión igual entre los agregados y el asfalto en las mezclas con polvo de llanta cuando se sometieron a condiciones saturadas. Esto destaca la importancia de mejorar el diseño de la mezcla para garantizar un mejor desempeño en condiciones saturadas.

7.2. Recomendaciones.

- Se recomienda realizar un estudio más detallado para ajustar el porcentaje de polvo de llanta en la mezcla, de manera que se logre un balance óptimo entre estabilidad, flujo y resistencia al agua. Además, considerar el uso de aditivos mejoradores de cohesión podría contribuir a mejorar el desempeño de las mezclas.
- Se recomienda incorporar el polvo de llanta de avión directamente en el diseño inicial de la mezcla asfáltica, en lugar de añadirlo posteriormente durante el proceso de elaboración. Este enfoque permitiría optimizar la interacción entre el polvo de llanta y el ligante asfáltico, asegurando una mejor distribución y cohesión en la mezcla. Además, la premezcla con el ligante asfáltico antes de realizar los ensayos de Marshall en condiciones secas y saturadas garantizaría una integración más uniforme, lo que podría mejorar las propiedades mecánicas y la resistencia de la mezcla final.
- Realizar pruebas de fatiga y al paso de los vehículos y altas temperaturas en el laboratorio bajo condiciones controladas para evaluar el comportamiento de las mezclas con polvo de llanta a lo largo del tiempo, en condiciones climáticas variables.
- Considerar modificaciones en la granulometría de los agregados para mejorar la compactación y reducir los porcentajes de vacíos en la mezcla, asegurando un mayor VAF y una mejor resistencia a las condiciones climáticas variables.
- Implementar un tramo de prueba en una vía de alto tráfico para validar los resultados de laboratorio en condiciones secas y determinar la viabilidad técnica y económica del uso de polvo de llanta de avión en mezclas asfálticas.

8. BIBLIOGRAFIA

(s.f.).

AASHTO. (2020). *Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures*. AASHTO T 209-20.

AASHTO Designation. (2004). *Viscosity Graded Asphalt Cement*. M226-80.

- Araiza Armenta, Juan Alberto. (2002). *Manejo de planta de concreto asfáltico y construcción de carpeta*. Universidad de Sonora- División de ingeniería.
- ASTM. (2017). *Standard Test Method for Determining the Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Mixtures Using a Vacuum*. . ASTM D2041-17.
- ASTM D1075-96. (2005). *Standard test method for effect of water on compressive strength of compacted bituminous*. ASTM International.
- ASTM International. (2021). *Standard test method for bulk specific gravity and density of compacted bituminous mixtures using saturated surface-dry specimens*. ASTM D272.
- CONASFALTO S.A.S. (2024). *Planta de producción de mezcla asfáltica*. Quito.
- David Espinoza, Carolina Guayaquil. (2023). DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO UTILIZANDO RAP (PAVIMENTO ASFALTICO RECICLADO) OBTENIDO DEL AEROPUERTO DE QUITO, ADICIONANDO 2%, 3% Y 4% DE POLVO DE LLANTA DE AVION. *PLAN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR* , 26,27.
- Huang. (2019). *Pavement Analysis and Design (3rd ed.)*. Pearson. Pearson.
- International, A. (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. Designation: C128 – 15.
- International, A. (2018). *Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*. Designation: C88/C88M – 18.
- International, A. (2020). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. Designation: C131/C131M – 20.
- International., A. (2019). *Standard Test Method for Flat Particles Elongated Particles or Flat and Elongated Particles in Coarse*.
- MTOP-001-F. (2002). *Especificaciones técnicas generales para mezclas asfálticas en caliente*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas. MTOP.
- Padilla Rodríguez, A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de* .
- Páramo & Poncino. (2012). *Diseño de mezclas asfálticas en caliente en los inicios del siglo XXI. La visión argentina. Mezclas convencionales*. Córdoba, Argentina: Seminario Pre Congreso. Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito XVI.
- Poncino, Páramo & , ASTM D1075-96. (2012, 2005). *Diseño de mezclas asfálticas en caliente en los inicios del siglo XXI. La visión argentina. Mezclas convencionales. Seminario Pre Congreso. Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito XVI. tandard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of* . Córdoba, Argentina.: Ponciano, Parámo y ASTM International.
- Reyes & Vargas . (2010). El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. *INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*.
- Rondón Quintana, H., & Reyes Lizcano, F. (2015). *Pavimentos: materiales, consturcción y diseño*. Bogotá: ECOE Ediciones.

The Asphalt Institute. (2020). *Glosario de términos*. Obtenido de <https://www.asphaltinstitute.org/engineering/glossary-of-terms/>

Yanez, I. G. (2018). EVA PUCE. En I. G. Yanez, *Pavimentos - Guía de Práctica de Campo* (págs. 140,141). Quito. Obtenido de EVA PUCE.

9. ANEXOS