

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



PLAN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA: EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO
MARSHALL CON MATERIAL DE LA MINA PIEDRA DE VAPOR UBICADA EN EL
CANTÓN PUERTO QUITO CON ASFALTO AC-20

AUTOR:

VICTOR ANDRÉS ESPINOZA PARRA

QUITO DM, JUNIO DE 2023

INDICE

CAPÍTULO 1	6
1.1 Introducción	6
1.2 Justificación.....	6
1.3 Planteamiento del problema	6
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.1 Objetivos específicos	6
CAPÍTULO 2.....	7
2.1 Marco teórico	7
2.1.1 Materiales Pétreos.....	7
2.1.2 Definición	7
2.2 Cemento asfáltico.....	9
2.2.1 Definición	9
2.2.2 Propiedades y características	9
2.2.3 Procedencia del cemento asfáltico.....	10
2.3 Mezclas asfálticas.....	10
2.3.1 Definición	10
CAPÍTULO 3.....	11
3.1 Ensayo de los materiales	11
3.1.1 Ensayos del material pétreo	11
3.1.2 Análisis granulométrico (ASTM C136/C136M-19).....	11
3.1.3 Gravedad específica y absorción del agregado.....	12
3.1.4 Equivalente de arena del agregado fino.....	14
3.1.5 Desgaste por abrasión del agregado grueso en máquina de los ángeles (ASTM C-131/C535).....	15
3.1.6 Durabilidad del agregado grueso a la acción de los sulfatos (ASTM C88)	16

3.1.7	Peso Unitario de los agregados (ASTM C29)	16
3.1.8	Terrones de arcilla (ASTM C142)	18
3.1.9	Porcentaje de caras fracturadas en partículas del agregado grueso (ASTM D5821-13)	19
3.1.10	Tabla de resultados	20
3.2	Ensayo del cemento asfáltico	21
3.2.1	Gravedad Específica (ASTM D70-17)	21
3.2.2	Viscosidad Cinemática (ASTM D2170)	22
3.2.3	Penetración (ASTM D5)	23
3.2.4	Punto de ablandamiento (ASTM D36)	24
3.2.5	Ductilidad (ASTM D113)	25
3.2.6	Punto Chispa (ASTM D92-66)	26
3.2.7	Tabla de resultados	27
CAPITULO 4		27
4.1	Diseño de mezcla asfáltica	27
4.1.1	Diseño de mezclas asfálticas según el Método Marshall	27
4.1.2	Propiedades volumétricas	28
4.2	Estabilidad y Flujo Marshall	32
4.3	Cálculos de la mezcla asfáltica	34
4.3.1	Dosificación de la mezcla del agregado	34
4.3.2	Determinación del porcentaje teórico de asfalto	36
4.3.3	Elaboración de briquetas	38
4.3.4	Cálculo de las propiedades volumétricas de las briquetas	40
CAPITULO 5		41
5.1	Análisis de resultados	41
5.1.1	Determinación del porcentaje óptimo de asfalto	41
5.2	Determinación de las propiedades de la mezcla asfáltica con el porcentaje óptimo de asfalto	41

CAPITULO 6.....	45
6.1 Conclusiones y recomendaciones.....	45
6.1.1 Conclusiones.....	45
6.1.2 Recomendaciones	46
BIBLIOGRAFIA	47
ANEXOS	49

INDICE FIGURAS

Figura 1	8
Figura 2	9
Figura 3	24
Figura 4	24
Figura 5	Error! Bookmark not defined.
Figura 6	26
Figura 7	38
Figura 8	39

INDICE TABLAS

Tabla 1	10
Tabla 2	15
Tabla 3	16
Tabla 4	18
Tabla 5	18
Tabla 6	20
Tabla 7	21
Tabla 8	35
Tabla 10	36
Tabla 11	37
Tabla 12	40

Tabla 13	40
----------------	----

INDICE ECUACIONES

Ecuación 3.1 Gravedad específica Bulk	12
Ecuación 3.2 Gravedad específica saturada con superficie seca.....	13
Ecuación 3.3 Gravedad específica aparente.....	13
Ecuación 3.4 Porcentaje de absorción.....	13
Ecuación 3.5 Gravedad específica Bulk	13
Ecuación 3.6 Gravedad específica del material saturado con superficie seca	14
Ecuación 3.7 Gravedad específica aparente.....	14
Ecuación 3.8 Porcentaje de absorción.....	14
Ecuación 3.9 Equivalente de arena para agregado fino.	15
Ecuación 3.10.....	17
Ecuación 3.11.....	17
Ecuación 3.12.....	17
Ecuación 3.13.....	17
Ecuación 3.14.....	19
Ecuación 3.15.....	19
Ecuación 3.16.....	19
Ecuación 3.17.....	20
Ecuación 3.18.....	22
Ecuación 4.1.....	29
Ecuación 4.2.....	29
Ecuación 4.3.....	29
Ecuación 4.4.....	29
Ecuación 4.5.....	30
Ecuación 4.6.....	30
Ecuación 4.7.....	30
Ecuación 4.8.....	31

Ecuación 4.9.....	31
Ecuación 4.10.....	31
Ecuación 4.11.....	32
Ecuación 4.12.....	36

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

1.2 Justificación

La importancia de la presente investigación se basa en que cuando se construye una carretera de pavimento flexible es importante tener en consideración que la mezcla asfáltica a utilizar cumpla con los parámetros de la normativa establecida en el MOP-001-F-2002, como lo son la estabilidad y flujo de mezcla. Son parámetros que nos permite asegurar el correcto comportamiento de la capa de rodadura que se aplicará en la vía, de esta forma se garantiza el correcto diseño y su funcionamiento a lo largo de la vida útil de la misma. Por lo tanto, se deberá contar con los materiales que forman parte de la mezcla asfáltica como lo son los porcentajes correctos de agregados pétreos triturados, mismos que serán obtenidos del material de canto rodado triturado de la mina Piedra de Vapor.

1.3 Planteamiento del problema

Este trabajo de integración curricular busca evaluar y verificar si los porcentajes tanto de los agregados como del asfalto utilizados por constructores en nuestro medio son los adecuados para poder producir una mezcla asfáltica que cumpla con los requerimientos de las propiedades volumétricas, estabilidad y flujo establecidos por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas en la normativa de Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F 2002. En este sentido, se investigará la calidad de los agregados pétreos provenientes de la Mina Piedra de vapor.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- ✓ Evaluar una mezcla asfáltica por el método Marshall con material de la mina Piedra de vapor ubicada en el cantón Puerto Quito, con asfalto AC-20.

1.4.1 Objetivos específicos

- ✓ Realizar un resumen de los aspectos teóricos sobre materiales pétreos, cemento asfáltico y mezclas asfálticas.
- ✓ Definir las propiedades mecánicas y físicas de los materiales de la mina Piedra de vapor, y del cemento asfáltico.
- ✓ Diseñar la mezcla asfáltica con el Método Marshall.
- ✓ Presentar y analizar los resultados relacionados con el diseño de la mezcla asfáltica.

CAPÍTULO 2

2.1 Marco teórico

2.1.1 Materiales Pétreos

2.1.2 Definición

“Los agregados que se emplearán en el hormigón asfáltico en planta podrán estar constituidos por roca o grava triturada total o parcialmente, materiales fragmentados naturalmente, arenas y relleno mineral” (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones,2002,p.298).

Los agregados a utilizar para hormigón asfáltico en planta deberán ser completamente secos, limpios, sólidos y resistentes, exentos de polvo, suciedad, arcilla u otras materias extrañas. (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones,2002, p.285)

2.1.2.1 Propiedades y características

Las propiedades y características del material pétreo tanto grueso, intermedio y fino deberán ser determinadas mediante diferentes ensayos de laboratorio, de esta forma podemos determinar el porcentaje óptimo de los diferentes tipos de agregados y del porcentaje óptimo de asfalto que se necesitará para el correcto diseño de la mezcla asfáltica. En base a esto, los agregados deberán cumplir los parámetros establecidos en las Especificaciones Generales Para La Construcción De Caminos Y Puentes (MOP-001-F 2002) como lo son:

- ✓ Granulometría.
- ✓ Gravedad específica, seca, saturada con superficie seca, aparente y absorción del árido.
- ✓ Abrasión en la máquina de los ángeles.
- ✓ Desgaste a los sulfatos.
- ✓ Terrones de arcilla.
- ✓ Partículas planas y alargadas.
- ✓ Porcentaje de caras fracturadas en el árido.
- ✓ Equivalente de arena.
- ✓ Materia Orgánico.

2.1.2.2 Procedencia de los agregados

Los agregados pétreos que se emplean para la construcción de hormigón asfáltico se pueden clasificar según las especificaciones dadas en el MOP-001-F 2002 en la sección 811-1.03.

- ✓ “Agregado grueso: Agregado cuyas partículas son retenidas por el tamiz INEN 4.75 mm. (N° 4)” (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones,2002, p.683).
- ✓ “Agregado fino: Porción de material que pasa el tamiz INEN 4.75 mm. (N° 4) y es retenida en el tamiz INEN 75 micrones (N° 200)” (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones,2002, p.683).
- ✓ “Relleno mineral: Porción de material que pasa el tamiz INEN 75 micrones (N° 200)” (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones,2002, p.683).

Los agregados para el presente trabajo de integración han sido obtenidos de la mina Piedra de Vapor que se ubica en el cantón Puerto Quito en la provincia de Pichincha a dos horas y media de la ciudad de Quito. Posteriormente los agregados fueron transportados al laboratorio de EMULDEC que se ubica en Calacalí sobre la vía Mitad del Mundo-Río Blanco para proceder con los ensayos necesarios.

Figura 2.1

Ubicación en Google Earth de la Mina Piedra de vapor.



Fuente: La imagen fue obtenida de Google Earth (2023).

Figura 2.2

Ubicación de la Planta de la empresa EMULDEC



Fuente: La imagen fue obtenida de Google Earth (2023).

2.2 Cemento asfáltico

2.2.1 Definición

Es un material aglomerante de color entre negro y pardo oscuro, cuyos constituyentes predominantes son betunes que se encuentran en la naturaleza o son obtenidos por destilación del petróleo. Se caracteriza por permanecer en estado semisólido a la temperatura del ambiente. Adicional los cementos asfálticos mezclados con agregados forman el hormigón asfáltico, el mismo que es empleado en pavimentos ya sea en la capa de rodadura o en base. (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002, p.669)

2.2.2 Propiedades y características

Las propiedades y características del cemento asfáltico son determinadas mediante ensayos de laboratorio en base a la normativa AASHTO e INNEN además de las especificaciones dadas por el MOP 001F-2002 en la sección 810, la tabla 810.2.1.

Tabla 2.1*Tabla 810.2.1 del MOP-001-F 2002*

ENSAYOS	60-70		85-100	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo
Betún original				
Penetración (25 °C, 100 gr, 5 s), mm/10.	60	70	85	100
Punto de ablandamiento A y B, °C.	48	57	45	53
Índice de penetración (*).	-1,5	+1,5	-1,5	+1,5
Ductilidad (25 °C, 5 cm/minuto), cm.	100	---	100	---
Contenido de agua (en volumen), % .	---	0,2	---	0,2
Solubilidad en Tricloroetileno, %.	99	---	99	---
Punto de inflamación, Copa Cleveland, °C.	232	---	232	---
Densidad relativa, 25 °C/ 25 °C	1,00	---	1,00	---
Ensayo de la mancha (**)	NEGATIVO		NEGATIVO	
Contenido de parafinas, %.	---	2.2	---	2.2
Ensayos al residuo del TFOT:				
Variación de masa, %.	---	0.8	---	1.0
Penetración, % de penetración original.	54	---	50	---
Ductilidad , cm	50	---	75	---
Resistencia al endurecimiento (***)	---	5,0	---	5,0

Fuente: La tabla fue obtenida del MOP-001-F 2002 de la sección 810 (2023).

En base a esto el cemento asfáltico deberá cumplir los parámetros establecidos por en las especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes (MOP 001F- 2002) como lo son:

- ✓ Punto de ablandamiento de cementos asfálticos.
- ✓ Ductilidad de cementos asfálticos.
- ✓ Penetración en materiales bituminosos de cementos asfálticos.
- ✓ Punto chispa/ llama Cleveland de cementos asfálticos.
- ✓ Viscosidad de Brookfield.

2.2.3 Procedencia del cemento asfáltico

El cemento asfáltico para el presente trabajo de integración curricular se ha obtenido de la Planta de EMULDEC, misma que obtiene el cemento asfáltico de la Refinería de Esmeraldas. La planta de EMULDEC mediante la noma INEN 2515 asegura que se esté trabajando con asfalto AC-20.

2.3 Mezclas asfálticas

2.3.1 Definición

Son aquellas mezclas asfálticas que “son elaboradas en caliente, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla” (Alamilla, 2020, p.21). Para

realizar el diseño de la mezcla asfáltica existen varios métodos entre los cuales está el método Marshall y el método Superpave, para el presente trabajo de titulación se utilizará el método Marshall.

“El método Marshall es un experimento de laboratorio dirigido al diseño de una adecuada mezcla asfáltica por medio del análisis de la estabilidad, flujo densidad y vacíos” (Miranda, 2016, p.9) que posee la mezcla asfáltica. El método Marshall tiene en consideración las propiedades de la mezcla asfáltica, tales como la densidad y los vacíos. De esta forma se puede garantizar que la mezcla que se esté diseñando se encuentre dentro de los rangos establecidos en la normativa vigente, en este caso el MOP 001F-2002, y así asegurar una mezcla durable con el tiempo.

CAPÍTULO 3

3.1 Ensayo de los materiales

3.1.1 Ensayos del material pétreo

Para la elaboración y diseño de una mezcla asfáltica es necesario considerar las diferentes composiciones granulométricas que tienen los agregados pétreos que serán usados para la mezcla asfáltica, de tal forma deberemos determinar las características y propiedades mecánicas de los agregados grueso y fino.

El Asphalt Institute afirma que:

El agregado ideal tiene el tamaño de partículas y clasificación adecuados, es fuerte y resistente y consistente en partículas angulares, casi equidimensional (cúbicas) con porosidad moderadamente baja. La superficie del agregado es limpia, áspera e hidrofóbica, lo que significa que tiene afinidad por el asfalto en lugar del agua.

(Asphalt Institute, 2007, p. 119)

Las mezclas asfálticas con una mayor estabilidad tienen partículas de agregado pétreo de mayor tamaño. De esta forma las propiedades mecánicas se determinarán siguiendo la normativa vigente tanto internacional como nacional, ASTM y las normas INEN (Menendez, 2009).

3.1.2 Análisis granulométrico (ASTM C136/C136M-19)

Este ensayo consiste en la clasificación de las fracciones gruesas y finas del agregado pétreo mediante el uso de tamices. El ensayo para el análisis granulométrico consiste en tomar una muestra de suelo seco y clasificarlo por la faja de tamices, por lo regular la serie de

tamices van desde la mayor hasta la menor abertura con una bandeja para el filler o material volátil establecida en la norma ASTM C136.

El ensayo de laboratorio nos permite determinar la distribución granulométrica de los agregados finos y gruesos mediante el uso de los tamices de abertura cuadrada o redonda establecidos en la norma ASTM C-136. (Guía de Materiales de Construcción, 2018, p. 16)

Este ensayo es de suma importancia para el diseño de la mezcla asfáltica, ya que de esta forma podemos determinar las cantidades optimas de los agregados, tanto fino como grueso, para cumplir con los limites mínimos y máximos que nos proporciona el MOP 001-F 2002.

3.1.3 Gravedad específica y absorción del agregado.

Este método nos permite determinar la densidad relativa y el porcentaje de absorción que tiene el agregado, tanto fino como grueso, que se va a utilizar para el diseño de la mezcla asfáltica.

La densidad relativa o gravedad específica es una cualidad adimensional que posee el material, y consiste en la relación de la densidad de las partículas del agregado y la densidad del agua. De esta forma la densidad relativa nos permite conocer el volumen absoluto del material que ocupará en la mezcla asfáltica a realizar. (ASTM Internacional, C128, p. 2)

El porcentaje de absorción del agregado nos permite obtener el cambio de masa del agregado pétreo debido a la absorción de agua en los poros de las partículas, en comparación con la masa del agregado en condición seca. (ASTM Internacional, C128, p. 2)

3.1.3.1 Agregado Grueso

En la normativa ASTM C-127 se mencionan las ecuaciones necesarias para obtener la gravedad específica bulk, saturada con superficie seca, aparente y el porcentaje de absorción.

- ✓ Gravedad Específica Bulk: (G_e)

Ecuación 3.1 Gravedad específica Bulk

$$G_e = \frac{A}{B - C}$$

- ✓ Gravedad Específica saturada con superficie seca: (G_{es})

Ecuación 3.2 Gravedad específica saturada con superficie seca

$$Ges = \frac{B}{B - C}$$

✓ Gravedad específica aparente: (Gea)

Ecuación 3.3 Gravedad específica aparente

$$Gea = \frac{A}{A - C}$$

✓ Porcentaje de absorción: (AB)

Ecuación 3.4 Porcentaje de absorción

$$AB = \frac{B - A}{A} \times 100$$

Donde:

A = Masa de la muestra seca (g).

B = Masa de la muestra saturada con superficie seca (g).

C = Masa de la muestra sumergida en el agua (g).

3.1.3.2. Agregado Fino

Para el caso específico para el agregado fino la normativa presenta dos métodos, el gravimétrico y el volumétrico, para la realización del ensayo de laboratorio. Para el presente trabajo se empleará el procedimiento y las ecuaciones del método volumétrico.

En la normativa ASTM C-128 se mencionan las ecuaciones necesarias para obtener la gravedad específica bulk, saturada con superficie seca, aparente y el porcentaje de absorción.

✓ Gravedad específica Bulk: (GE)

Ecuación 3.5 Gravedad específica Bulk

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

✓ Gravedad específica Bulk: (Ges)

Ecuación 3.6 Gravedad específica del material saturado con superficie seca

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

✓ Gravedad específica aparente: (Gea)

Ecuación 3.7 Gravedad específica aparente

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

✓ Porcentaje de absorción: (Ab)

Ecuación 3.8 Porcentaje de absorción

$$Ab = \frac{S - A}{A} \times 100$$

Donde:

A = Masa de la muestra seca (g).

B = Masa del matraz con agua (g).

C = Masa de la muestra + matraz + agua (g).

S = Masa de la muestra saturada con superficie seca

3.1.4 Equivalente de arena del agregado fino.

Este método permite la identificación del tipo de material que se tiene y la composición de este, es decir, que el método sirve para conocer la cantidad de arcilla o polvos plástico que estén presentes en el material granular fino. De esta manera se puede determinar la calidad del agregado fino y conocer de antemano la presencia de partículas de material como arcillas y polvos plásticos que pueda afectar al diseño de la mezcla asfáltica.

El MOP 001-F 2002 establece que el equivalente de arena para una mezcla de concreto asfáltico no deberá ser menor a 45. Además, que se deberán realizar como mínimo 3 ensayos para poder obtener un promedio y una lectura real del ensayo del equivalente de arena.

La normativa ASTM D 2419 establece la siguiente ecuación para establecer el equivalente de arena.

Ecuación 3.9 Equivalente de arena para agregado fino.

$$SE = \frac{\text{Lectura B}}{\text{Lectura A}} \times 100$$

Donde:

SE = Equivalente de Arena

Lectura A = Lectura de arena (Sedimento).

Lectura B = Lectura de arcilla (Suspensión).

3.1.5 Desgaste por abrasión del agregado grueso en máquina de los ángeles (ASTM C-131/C535)

Para la construcción de una capa de rodadura de concreto asfáltico, es necesario conocer la resistencia de los agregados pétreos ya que de la resistencia de estos dependerá el desempeño que la capa de rodadura tenga a lo largo de la vía útil de la vía. La resistencia al desgaste de los agregados es importante ya que estos se encuentran expuestos a aplastamiento y a desgaste abrasivo excesivo durante todo el proceso del diseño y construcción de la capa de rodadura. (Asphalt Institute, 2007).

Este procedimiento de laboratorio permite ensayar partículas con tamaño máximo de 1^{1/2} in para conocer la resistencia al desgaste mediante el uso de la máquina de Los Ángeles, de esta forma se puede determinar la calidad del agregado. El ensayo se realiza mediante el uso de un tambor giratorio que en su interior contiene el agregado y un número de esferas de acero que dependen de la tabla especificada en la norma ASTM C131.

Tabla 3.1

Tabla de masa de carga por abrasión de la Norma ASTM C131/C131M-20

GRADACION	NUMERO DE ESFERAS	MASA DE LA CARGA g.
A	12	5.000 ± 25
B	11	4.584 ± 25
C	8	3.330 ± 20
D	6	2.500 ± 15

Fuente: La tabla fue obtenida de la Norma ASTM C131 del literal 6. (2020).

Tabla 3.2

Tabla de gradaciones de las muestras de ensayo de la Norma ASTM C131/C131M-20

TAMAÑO DEL TAMIZ				MASA DE LOS TAMAÑOS INDICADOS (g.) GRADACION			
PASA		RETIENE		A	B	C	D
1 ½	37.5	7	25.0	1250±25			
1	25.0	¾	19.0	1250±25			
¾	19.0	½	12.5	1250±10	2500±10		
½	12.5	3/8	9.5	1250±10	2500±10		
3/8	9.5	No. 3	6.3			2500±10	
No. 3	6.3	No. 4	4.75			2500±10	
No. 4	4.75	No. 8	2.36				5000±10
TOTAL				5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

Fuente. La tabla fue obtenida de la Norma ASTM C131 del literal 9, tabla 1. (2020).

El procedimiento establecido en la normativa ASTM C131 permite clasificar al material en la gradación tipo A, de esta forma se determina el número de esferas de acero que se colocará junto al material en el tambor giratorio de la máquina de Los Ángeles que a simulará la acción abrasiva que el agregado estará expuesto. Culminado el ensayo se determina el porcentaje de pérdida producido por el desgaste del agregado pétreo.

3.1.6 Durabilidad del agregado grueso a la acción de los sulfatos (ASTM C88)

El ensayo permite obtener información importante respecto a la solidez del agregado y el desempeño que este tendrá en condiciones de intemperie. La norma ASTM C88 establece un procedimiento para la realización del ensayo, el cual consiste en sumergir el material en una solución de sulfato de sodio o de magnesio y secarlo al horno hasta deshidratar completamente la sal precipitada en los espacios de los poros de los agregados (ASTM International, 2018).

3.1.7 Peso Unitario de los agregados (ASTM C29)

El ensayo de laboratorio para obtener el peso unitario de los agregados permite determinar la densidad de Bulk en el material suelto y compactado, misma que permite conocer la relación entre la masa y el volumen de los agregados en condición seca además de los vacíos que existen entre las partículas finas y gruesas de la muestra de material.

La norma establece un procedimiento para obtener ensayar el material compactado y el material suelto, además de las ecuaciones para obtener la masa del material compactado y suelto, además el peso unitario compactado y suelto.

✓ **Masa del material compactado**

Ecuación 3.10

$$M_c = B - P$$

✓ **Peso unitario compactado**

Ecuación 3.11

$$P_{uc} = \frac{M_c}{V}$$

✓ **Masa del material suelto**

Ecuación 3.12

$$M_s = A - P$$

✓ **Peso Unitario suelto**

Ecuación 3.13

$$P_{us} = \frac{M_s}{V}$$

Donde:

M_c = Masa del material compactado (Kg)

B = Masa del recipiente más el material compactado (Kg).

P = Masa del recipiente (Kg).

P_{uc} = Peso Unitario compactado (Kg/m³).

V = Volumen del recipiente (m³).

M_s = Masa del material suelto (Kg).

A = Masa del molde más el material suelto (Kg).

P_{us} = Peso Unitario suelto (Kg/m³).

3.1.8 Terrones de arcilla (ASTM C142)

La norma ASTM C142 establece un procedimiento para la determinación de terrones de arcilla presente en los agregados pétreos. Además, la norma establece condiciones para determinar la masa mínima que se utilizará misma que depende del tamaño de las partículas del agregado.

Tabla 3.3

Tabla de masa mínima de muestra de agregado grueso, Norma ASTM C142

TAMAÑO DEL TAMIZ				MASA MINIMA
PASA		RETIENE		Kg
Pulg.	mm.	Pulg.	Mm.	
3/8	9.5	No. 4	4.76	1.0
¾	19.0	3/8	9.50	2.0
1 ½	38.1	3/4	19.00	3.0
Más de 1 ½" (38,1mm)				5.0

Fuente: La tabla fue obtenida de la Norma ASTM C142 del literal 6 (2017).

Una vez que el material haya sido ensayado mediante el procedimiento establecido, la norma establece los tamices por los cuales se realice el lavado de la muestra.

Tabla 3.4

Tabla de tamices de lavado para el agregado grueso, Norma ASTM C142

TAMAÑO DE LAS PARTICULAS				TAMAÑO DEL TAMIZ DE LAVADO	
PASA		RETIENE			
Pulg.	mm.	Pulg.	mm.	Pulg.	Mm.
3/8	9.5	No. 4	4.76	No. 8	2.36
3/4	19.0	3/8	9.50	No. 4	4.75
1 ½	38.1	3/4	19.0	No. 4	4.75
Más de 1 ½" 38.1				No. 4	4.75

Fuente: La tabla fue obtenida de la Norma ASTM C142 del literal 7 (2017).

En base a lo mencionado se establecen lo siguiente:

- ✓ **Agregado fino**

Ecuación 3.14

$$P = \frac{M - Mr}{M} \times 100$$

✓ **Agregado grueso**

Ecuación 3.15

$$P = \frac{M - Mr}{M} \times 100$$

✓ **Porcentaje parcial de arcilla en terrones**

Ecuación 3.16

$$Pp = \frac{\% \text{ Retenido Parcial}}{100} \times P$$

Donde:

P= Porcentaje de arcilla en terrones

M= Masa inicial de la muestra (gr).

Mr= Masa seca de la muestra retenida en el tamiz después del ensayo (gr).

Pp= Porcentaje parcial de arcilla en terrones.

Este ensayo es de suma importancia para determinar la aceptabilidad de los agregados en base a las normas establecidas por la ASTM respecto a los agregados pétreos.

3.1.9 Porcentaje de caras fracturadas en partículas del agregado grueso (ASTM D5821-13)

Este método busca determinar el porcentaje de caras fracturadas del agregado, el propósito del ensayo es para maximizar la resistencia a la cizalladura mediante el incremento de la fuerza de fricción que existe entre las partículas del agregado que componen la mezcla asfáltica. Otro propósito de este ensayo es dar estabilidad a la mezcla asfáltica mediante la cohesión que existe entre partículas gracias a su textura y forma. (ASTM International, 2017).

La norma establece una relación para obtener el porcentaje de partículas con caras fracturadas del agregado.

Ecuación 3.17

$$P = [F1(F + N)] \times 100$$

Donde:

P= Porcentaje de caras fracturadas

F= Masa o conteo de partículas con al menos el número especificado de caras fracturadas.

N= Masa o conteo de partículas sin caras fracturadas o que no cumple con especificado de caras fracturadas.

3.1.10 Tabla de resultados

Tabla 3.5

Tabla de resultados de agregado grueso 3/4

Agregado Grueso 3/4						
Norma	Parámetro	Resultado	Unidad	Límites		Cumple
				Máximo	Mínimo	
ASTM C136	Granulometría	Ver Anexos				SI
ASTM C127	Gravedad Específica Bulk (Ge)	2,672011	gr/cm3	-	-	
ASTM C127	Gravedad Específica con superficie seca	2,697395	gr/cm3	-	-	
ASTM C127	Gravedad Específica aparente	2,741604	gr/cm3	-	-	
ASTM C127	Porcentaje de absorción	0,95	gr/cm3	-	-	
ASTM C131	Abrasión en la máquina de Los Ángeles	18,28	%	40		SI
ASTM C88	Desgaste a los sulfatos	1,9	%	18		SI
ASTM C142	Terrones de arcilla 3/4	3,462051		-	-	SI
ASTM C142	Terrones de arcilla 3/8	5,094905		-	-	SI
ASTM C142	Terrones de arcilla N. 4	10,00		-	-	SI
	Peso unitario/volumétrico	0,004	Kg/cm3			

Fuente: La tabla de resultados de la mina Piedra de Vapor.

Tabla 3.6*Tabla de resultados de agregado fino N.4*

Agregado Fino N. 4						
Norma	Parámetro	Resultado	Unidad	Limites		Cumple
				Máximo	Mínimo	
ASTM C136	Granulometría	Ver Anexos				SI
ASTM C127	Gravedad Específica Bulk (Ge)	2,391515	gr/cm3	-	-	
ASTM C127	Gravedad Específica con superficie seca	2,628674	gr/cm3	-	-	
ASTM C127	Gravedad Específica aparente	3,13501	gr/cm3	-	-	
ASTM C127	Porcentaje de absorción	2,528206	gr/cm3	-	-	
ASTM C88	Desgaste a los sulfatos	2,6	%	18	-	SI
ASTM D2419	Equivalente de arena	65	%	-	50	SI
	Peso unitario/volumétrico	0,001439	Kg/cm3			

Fuente. La tabla de resultados de la mina Piedra de Vapor.

3.2 Ensayo del cemento asfáltico

Conocer las propiedades mecánicas del cemento asfáltico con el cual se realizará el diseño de la mezcla es fundamental, ya que el cemento asfáltico es aquel material ligante para los agregados pétreos que conformará la capa de rodadura. De esta forma es imprescindible conocer sus propiedades ya que este brindará resistencia mecánica bajo cargas estáticas y cíclicas, además de impermeabilizar la superficie y asegurar la durabilidad.

Para la determinación de las propiedades del cemento asfáltico se han realizado ensayos de laboratorio siguiendo los parámetros establecidos en normas internacionales ASTM y seguir lo establecido por la normativa local como los Son las normas INEN.

3.2.1 Gravedad Específica (ASTM D70-17)

La gravedad específica para cementos asfálticos se conoce que es la relación que existe entre el peso del asfalto en aire y un peso igual de agua a la misma temperatura de 25 °C (ASTM International)

El ensayo de gravedad específica mediante el método del picnómetro se utiliza generalmente para asfaltos semisólidos y emulsiones asfálticas. Los valores obtenidos en este ensayo se utilizan para convertir volúmenes a unidades de masa y para corregir volúmenes que han sido medidos a la temperatura de ensayo y se determina mediante la ecuación establecida por la norma ASTM D70 a continuación:

Ecuación 3.18

$$\text{Gravedad Específica} = \frac{(C - A)}{[(B - A) - (D - C)]}$$

Donde:

A= Masa del picnómetro y tapón secos.

B= Masa del picnómetro, tapón y agua destilada.

C= Masa del picnómetro, tapón y asfalto.

D= Masa del Picnómetro, tapón, asfalto y agua destilada.

3.2.2 Viscosidad Cinemática (ASTM D2170)

El ensayo establecido en la norma ASTM D2170, busca determinar la viscosidad cinemática para asfaltos líquidos a temperatura de 60 °C y para asfaltos sólidos a temperatura de 135 °C en un rango de 6 a 100 000 mm²/s, los resultados de este ensayo pueden ser utilizados para calcular la viscosidad cuando la densidad de la muestra a temperatura de ensayo es conocida o puede ser determinada.

Figura 3.1

Viscosímetro de la empresa EMULDEC



Fuente: La imagen corresponde al equipo de Viscosímetro (2023).

3.2.3 Penetración (ASTM D5)

El ensayo permite medir la consistencia y dureza que tienen los cementos asfálticos semisólidos y sólidos, se entiende que a mayores valores de penetración se tendrán cementos asfálticos de consistencia suave.

El ensayo establece un procedimiento bajo condiciones controladas para preparar la muestra de cemento asfáltico, mismo que se deberá calentar y enfriar la muestra. Mediante el uso de un penetrómetro estandarizado que contiene una aguja estándar a 25 °C se puede determinar la penetración del equipo sobre la muestra, los resultados obtenidos serán la distancia que la aguja ha penetrado en la muestra de asfalto en un periodo de tiempo. La norma establece las siguientes condiciones:

- ✓ Peso de la aguja y accesorios = 100 gramos.
- ✓ Tiempo = 5 segundos.
- ✓ Temperatura = 25 °C

Se deberá realizar al menos 3 veces el ensayo de penetración seguidos sobre la misma muestra de asfalto, lo ideal será realizarlas separadas por centésimas de centímetro (ASTM International, 2020).

Figura 3.2

Penetrómetro de la empresa EMULDEC



Fuente: La imagen corresponde al equipo para medir la penetración del bitumen (2023).

3.2.4 Punto de ablandamiento (ASTM D36)

El cemento asfáltico es considerado un material viscoelástico, es decir que tienen la capacidad de ser más suaves y menos viscosos cuando la temperatura aumenta gradualmente. Por este efecto el punto de ablandamiento permite conocer la temperatura a la cual el cemento asfáltico fluye o sufre deformaciones a causa del incremento gradual de temperatura.

El cemento asfáltico pierde su consistencia al calentarlo, el ensayo permite determinar el punto de reblandecimiento del cemento asfáltico en el rango de temperatura de 30 hasta 157 °C mediante el uso del aparato de anillo y bola.

El ensayo consiste en calentar dos anillos de bronce que soportan sobre sí dos bolas de acero que se encuentran dentro de un matraz con agua destilada. El punto de reblandecimiento es cuando la muestra en los dos anillos de bronce alcanza una temperatura tal que permite que la bola de acero envuelta en la muestra caiga una distancia de 25 mm. (ASTM International, 2020)

Figura 3.3

Equipo de anillo y bola de la empresa EMULDEC



Fuente: La imagen corresponde al equipo para medir el punto de ablandamiento del bitumen (2023).

3.2.5 Ductilidad (ASTM D113)

El ensayo de ductilidad para cementos asfálticos proporciona información sobre las propiedades de tracción de los materiales asfálticos y su ductilidad. Lo ideal para una mezcla asfáltica es que el cemento asfáltico tenga un comportamiento dúctil, ya que de esta forma se pueden prevenir efectos como agrietamientos en temperaturas bajas. Además, si se presenta un comportamiento dúctil se producen deformaciones elásticas bajo las cargas solicitadas en la vía sin que se presenten fallos en la estructura del pavimento (Rondón, 2015).

El ensayo inicia con la colocación de la muestra dentro de un molde de bronce que será sujetado de sus extremos y ensayado a tracción dentro del aparato para ductilidad que ejercerá una fuerza de tracción a temperatura de 25 °C y tendrá una velocidad constante de 5

cm/min. Una vez roto el espécimen de asfalto ensayado se determina la distancia que recorrió desde el inicio del ensayo hasta el fin en centímetros. (ASTM International, 2018)

Figura 3.4

Ductilímetro de la empresa EMULDEC



Fuente: La imagen corresponde al equipo para medir la ductilidad del bitumen (2023).

3.2.6 Punto Chispa (ASTM D92-66)

El punto de inflamación es un ensayo en el cual se determina la temperatura crítica a la cual los vapores que son desprendidos por el cemento asfáltico producen destellos por inflamación y se continua hasta que la muestra se encienda y se deberá tener encendida durante un mínimo de 5 segundos.

El ensayo de punto de inflamación indica la presencia de materiales volátiles e inflamables o materiales contaminantes como combustibles que pueden afectar a las características del cemento asfáltico.

Figura 3.5

Equipo para ensayo de Punto de inflamación de la empresa EMULDEC



Fuente: La imagen corresponde al equipo para medir el punto de inflamación del bitumen (2023).

3.2.7 Tabla de resultados

TABLA DE RESULTADOS ASFALTO AC-20					
ENSAYO	VALOR	UNIDADES	MÍNIMO	MÁXIMO	CUMPLE
Gravedad Específica	260	g/cm ³	232	-	SI
Viscosidad Cinemática a 135 °C	383,4	mm ² .s ⁻¹	300	-	SI
Pentración	91	1/10 min	60	70	NO
Punto de ablandamiento	49	°C	48	-	SI
Ductilidad	118	cm	100	-	SI
Punto de inflamación	260	°C	232	-	SI

CAPITULO 4

4.1 Diseño de mezcla asfáltica

4.1.1 Diseño de mezclas asfálticas según el Método Marshall

El método Marshall fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de mezclas asfálticas, para el diseño de mezclas asfálticas para pavimentación y solo es aplicable para mezclas asfálticas en caliente empleando cemento asfáltico y agregado mineral cuya gradación deberá ser menor a 25.4 mm o 1 in.

El método puede emplearse para diseño de mezcla asfáltica en laboratorio como para el control en la ejecución de la carpeta asfáltica con mezclas asfálticas en caliente.

Las siguientes normativas ASTM International han estandarizado los procedimientos para el método Marshall:

- ✓ ASTM D6927: Método de prueba estándar para estabilidad Marshall y flujo de mezclas bituminosas.
- ✓ ASTM D6926: Preparación de mezclas bituminosas utilizando aparatos Marshall.
- ✓ ASTM D1559: Resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando aparatos Marshall.

Para la preparación de especímenes para el método Marshall se deberá realizar briquetas cilíndricas de la mezcla asfáltica, las mismas que deberán tener 63.5 milímetros o 2.5 pulgadas de altura, 102 milímetros o 4 pulgadas de diámetro según lo establecido por la norma ASTM D6927.

La norma establece procedimientos controlados para la elaboración de briquetas para ser ensayadas por el método Marshall, la misma comprende procesos como calentado, combinación, compactación y el posterior ensayo en el aparato Marshall. Es importante considerar que las briquetas son realizadas con la misma cantidad de agregado y lo que difiere una de otra es el porcentaje de asfalto que contiene. Mediante el ensayo Marshall se pueden obtener valores como el peso específico, estabilidad, flujo, densidad y la relación de vacíos que tiene la mezcla asfáltica.

4.1.2 Propiedades volumétricas

Las propiedades volumétricas proporcionan información importante para el diseño de la mezcla asfáltica, como lo es el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica. El Asphalt Institute establece un rango para el contenido de vacíos en la mezcla, que va desde el 3 al 5 por ciento siendo lo ideal el 4 por ciento. Siendo así, las propiedades volumétricas como lo son las medidas de diámetro, espesor, peso en aire, sumergido y saturado con superficie seca permiten obtener la gravedad específica de las briquetas mediante la aplicación de ecuaciones establecidas en las normas antes mencionadas. (Asphalt Institute, 2001)

Las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas permiten encontrar los parámetros para definir el rendimiento de esta mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

- ✓ Gravedad específica Bulk:

Ecuación 4.1

$$Gb = \frac{Wa}{W_{ss} - Ww}$$

Donde:

Wa= Peso seco en el aire.

Wss= Peso saturado con superficie seca.

Ww= Peso sumergido en el agua.

$$V = W_{ss} - Ww$$

✓ Gavedad específica Bulk del agregado total:

Ecuación 4.2

$$Gsb = \frac{100}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \dots + \frac{Pn}{Gn}}$$

Donde:

P1,n= Porcentaje de la mezcla.

G1,n= Gravedad específica Bulk del agregado total.

✓ Gavedad específica aparente del agregado total:

Ecuación 4.3

$$Gsa = \frac{100}{\frac{P1}{g1} + \frac{P2}{g2} + \dots + \frac{Pn}{gn}}$$

Donde:

P1,n= Porcentaje de la mezcla.

g1,n= Gravedad específica aparente de cada material.

✓ Gravedad específica máxima teórica:

Ecuación 4.4

$$Gmt = \frac{100}{\frac{Ps}{Gsb} + \frac{Pb}{Gasf}}$$

Donde:

P_s = Porcentaje de agregado en la mezcla.

G_{sb} = Gravedad específica Bulk del agregado total.

P_b = Porcentaje de asfalto en la mezcla.

G_{asf} = Gravedad específica del asfalto.

✓ Gravedad específica máxima medida (Rice):

Ecuación 4.5

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (B - C)}$$

Donde:

A = Peso de la mezcla

B = Peso frasco + mezcla + agua

C = Peso frasco + agua

✓ Asfalto absorbido:

Ecuación 4.6

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \times G_{asf}$$

Donde:

G_{se} = Peso específico efectivo del agregado

G_{sb} = Peso específico bruto del agregado total

G_{asf} = Gravedad específica del asfalto

✓ Asfalto efectivo de la mezcla:

Ecuación 4.7

$$P_{be} = P_b \times \frac{P_{ba}}{100} \times P_s$$

Donde:

Pb= Porcentaje de asfalto en la mezcla

Pba= Asfalto absorbido

Ps= Porcentaje de agregado en la mezcla

✓ Relación Filler/ Asfalto:

Ecuación 4.8

$$f/a = \frac{\% \text{ pasa } \#200}{Pbe}$$

Donde:

Pbe= Porcentaje de asfalto efectivo

✓ Porcentaje de vacíos con aire:

Ecuación 4.9

$$\%Vv = \left(1 * \frac{Gb}{Gmm}\right) * 100$$

Donde:

Gb= Gravedad Bulk de la briqueta.

Gmm= Gravedad especifica máxima medida.

✓ Porcentaje de Volumen agregado vs Volumen total:

Ecuación 4.10

$$Vagre = \frac{Ps \times Gb}{Gsb}$$

Donde:

Ps= Porcentaje de agregado en la mezcla.

Gb= Gravedad Bulk de la briqueta.

Gsb= Gravedad especifica Bulk del agregado total.

✓ Porcentaje de Vacíos agregado mineral:

Ecuación 4.11

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

Donde:

V_{agre}= Volumen de agregado vs Volumen total.

4.2 Estabilidad y Flujo Marshall

La estabilidad de Marshall es un parámetro que representa la capacidad de la muestra asfáltica para resistir una carga de deformación constante, lo cual se identifica como la resistencia en libras. Se conoce que la estabilidad de mezcla depende de la cantidad de asfalto y de la granulometría de los agregados pétreos. La norma menciona valores mínimos para la estabilidad, por ende, se recomiendan valores altos siempre y cuando cumplan con la durabilidad y resistencia de la mezcla asfáltica. El Asphalt Institute en la tabla 7.1 establece factores de corrección para los valores de estabilidad que dependerán del volumen y espesor de la briqueta.

El MOP 001-F 2002 establece parámetros para el diseño de la mezcla asfáltica, los cuales son la estabilidad y el flujo, mismos que dependerán del tipo de tráfico para el cual se esté realizando el diseño de la mezcla. La tabla 405.5.4 de la especificación menciona los límites mínimos y máximos para los parámetros antes mencionados como se muestra a continuación:

Tabla 4.1

Tabla 405.5.4 Especificaciones para una mezcla asfáltica según el MOP 001-F 2002.

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 vacíos 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
% Vacíos 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: La tabla fue obtenida del MOP 001-F 2002.

El flujo de mezcla corresponde a la deformación vertical que presenta la briqueta cuando esta falla por acción de la carga, es decir que el flujo es la capacidad que tiene la mezcla asfáltica de resistir al asentamiento gradual y a la deformación que tiene cuando falla la briqueta cilíndrica.

La norma ASTM establece el siguiente procedimiento para obtener los valores de estabilidad y flujo de las briquetas cilíndricas de la mezcla asfáltica una vez que se hayan enfriado:

1. Determinar la altura de cada briqueta.
2. Sumergir de 30 a 45 minutos la briqueta a baño maría a temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.
3. Una vez pasado el tiempo se seca la briqueta y con cuidado se coloca centrada en la mordaza de prueba y se coloca el conjunto centrado en la prensa.
4. Se aplica una carga a la briqueta a una velocidad de deformación constante de 50.8 mm/min hasta que se produzca la rotura. Una vez finalizado el ensayo se toman las lecturas de estabilidad y flujo.

4.3 Cálculos de la mezcla asfáltica

4.3.1 Dosificación de la mezcla del agregado

Debido a la capacidad de trituración de la cantera Piedra de Vapor para el presente trabajo de integración curricular se ha utilizado 2 tipos de agregados para la conformación de la mezcla, Grueso (3/4 plg) y Fino (N. 4). El ensayo de granulometría de los agregados pétreos permite la caracterización del material y conocer sus propiedades mecánicas para definir las cantidades necesarias de cada agregado para la mezcla asfáltica. El MOP 001-F 2002 en la tabla 405.5.1 proporciona los siguientes tipos de clasificación según su granulometría para la elaboración de las briquetas:

Tabla 4.2

Tabla 405.5.1 Faja granulométrica para una mezcla asfáltica según el MOP 001-F 2002.

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	3/4"	1/2"	3/8"	Nº4
1" (25.4 mm.)	100	--	--	--
3/4" (19.0 mm.)	90 - 100	100	--	--
1/2" (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: La tabla fue obtenida del MOP 001-F 2002 sección 405.

Para el diseño de la mezcla para el presente trabajo de integración se ha utilizado la franja de 3/4", para lo cual se ha realizado ensayos granulométricos del material grueso y fino. Los resultados de la granulometría de ambos agregados deberán estar dentro de los límites para cada tamiz especificado en la tabla anterior y de preferencia que la curva granulométrica resultante se encuentre centrada en la franja. Cumpliendo con lo mencionado, se ha determinado los siguientes porcentajes de cada agregado.

Tabla 4.3

Tabla de porcentaje de mezcla de agregados.

% DE MEZCLA		
A	0,45	45
B	0,55	55

Fuente. La tabla fue obtenida de los resultados tabulados en el programa Excel.

En base a los porcentajes presentados en la tabla anterior, se ha obtenido las cantidades en gramos de los agregados clasificados por la abertura de cada tamiz. De esta forma se ha obtenido la siguiente tabla en base a los pesos acumulados de la granulometría realizada.

Tabla 4.4

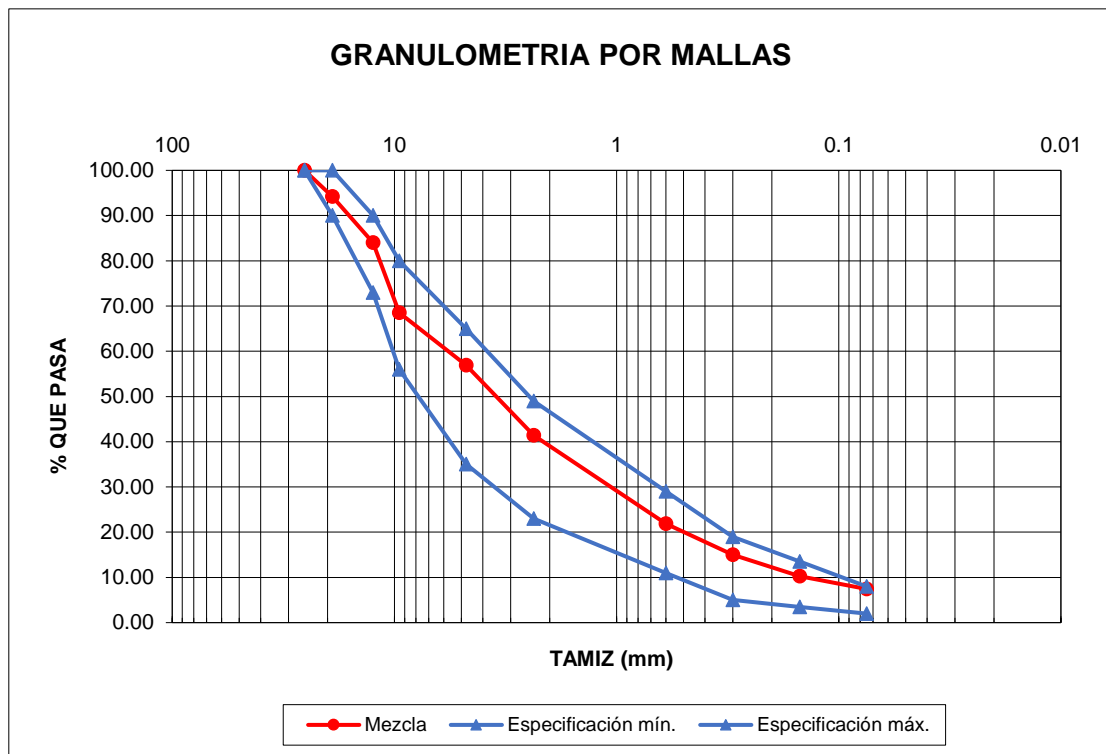
Tabla de porcentaje de mezcla de agregados.

MEZCLAS DE AGREGADOS											
Tamiz #	1	3.4	1.2	3.8	4	8	30	50	100	200	p #200
Tz mm.	25,4	19	12,5	9,5	4,75	2,36	0,6	0,3	0,15	0,075	p 0,075
mat. A	100,00	87,16	64,41	30,01	6,40	2,22	1,83	1,72	1,57	1,29	
mat. A	100,00	100,00	100,00	100,00	98,20	73,51	38,26	25,93	17,35	12,47	
mezcla	100,00	94,22	83,98	68,50	56,89	41,43	21,87	15,04	10,25	7,44	
Ret.Ac.	0,00	5,78	16,02	31,50	43,11	58,57	78,13	84,96	89,75	92,56	7,44
Ret.Parc.	0,00	5,78	10,24	15,48	11,61	15,46	19,56	6,83	4,79	2,81	
peso	0,00	63,56	112,61	170,28	127,76	170,07	215,19	75,14	52,65	30,91	81,83
p. acum.	0,00	63,56	176,17	346,45	474,21	644,28	859,47	934,61	987,26	1018,17	1100,00
Espec mín	100	90	---	56	35	23	---	5	---	2	
Espec máx	100	100	---	80	65	49	---	19	---	8	

Fuente: La tabla fue obtenida de los resultados tabulados en el programa Excel.

Tabla 4.5

Tabla de porcentaje de mezcla de agregados.



Fuente: La tabla fue obtenida de los resultados tabulados en el programa Excel.

4.3.2 Determinación del porcentaje teórico de asfalto

Posterior a la obtención de los porcentajes de mezcla de los agregados a utilizar, se determinará el porcentaje de asfalto teórico para la preparación de las briquetas de la mezcla asfáltica. Una vez obtenido el porcentaje de asfalto óptimo se deberán elaborar briquetas teniendo en consideración que se deberá tener una variación de 0.5% de contenido de asfalto, se deberán realizar al menos 5 porcentajes de asfalto que corresponderán a dos porcentajes por encima y dos por porcentajes por debajo del porcentaje de asfalto teórico de asfalto.

Para determinar el porcentaje teórico de asfalto el MOP-001-F 2002, en base al Asphalt Institute, establece la siguiente ecuación denominada "Formula Maestra de obra" que se estima como el equivalente al porcentaje de agregado en la gradación final que pasa por el tamiz #200 (Asphalt Institute, 2001):

Ecuación 4.12

$$P = 0.035a + 0.045b + kc + F$$

Donde:

P= Contenido teórico de asfalto

a= Porcentaje de agregado retenido en el tamiz #8 (2.36 mm)

b= Porcentaje de agregado pasante del tamiz #8 (2.36 mm) y retenido en el tamiz #200 (0.075 mm).

c= Porcentaje de agregado que pasa por el tamiz #200 (0.075 mm).

Los valores de k se usan en base a lo siguiente:

- ✓ 0.15 cuando pasa del 11 al 15 por ciento del tamiz #200 (0.075 mm).
- ✓ 0.18 cuando pasa del 6 al 10 por ciento el tamiz #200 (0.075 mm).
- ✓ 0.20 cuando pasa el 5 por ciento o menos el tamiz #200 (0.075 mm).

F= Depende de la absorción del agregado liviano o pesado puede ser de 0 a 2 por ciento, para el diseño se utilizará 2.

Tabla 4.6

Tabla para obtener el valor de F.

Parámetro F			
Nombre	% de absorción	% de mezcla	F
Agregado Grueso 3/4	0,95	0,45	0,4275
Agregado fino N. 4	3,973881761	0,55	2,185635
F Total para usar			2

Fuente: La tabla fue obtenida de los resultados tabulados en el programa Excel.

Tabla 4.7

Tabla de porcentaje de óptimo de asfalto para la mezcla.

Porcentaje óptimo de asfalto	
a	58,57
b	14,43
k	0,18
c	7,44
F	2
P= 0,035a+0,045b+kc+F	
P	6,04

Fuente: La tabla fue obtenida de los resultados tabulados en el programa Excel.

4.3.3 Elaboración de briquetas

Al tener 5 porcentajes de asfalto para la elaboración de briquetas se deberán realizar 3 briquetas por cada porcentaje de asfalto, es decir que se tendrán que realizar en total 15 briquetas con la mezcla de agregados pétreos presentada anteriormente. Adicional se deberán preparar 5 muestras para el ensayo de Rice con el mismo porcentaje que se realizaron las briquetas cilíndricas.

Para determinar las relaciones volumétricas presentadas en el literal 4.2 será necesario la elaboración de las briquetas que deberán pesar 1100 gramos que serán conformados por el peso de cada tamaño de agregado en base a la serie de tamices que ha sido obtenido de la dosificación mezcla de los materiales presentada anteriormente. De igual forma para la elaboración del ensayo RICE, necesario para obtener el porcentaje de vacíos, se deberán realizar 5 muestras de 2200 gramos con los porcentajes de asfalto y el mismo porcentaje de mezcla que se realizaron las briquetas.

Figura 4.1

Briquetas de la mezcla asfáltica realizadas en la planta de la empresa EMULDEC



Fuente: La imagen corresponde a las briquetas realizadas con la mezcla en caliente (2023).

Para la realización de las briquetas es necesario establecer la temperatura que tendrá el asfalto para la mezcla, que se recomienda que sea en el rango de 155 a 160 grados centígrados. Además, se deberá determinar la temperatura de compactación de las briquetas,

ya que de esto dependerá la consistencia de esta, es recomendado que la temperatura de compactación este entre 140 a 145 grados centígrados para mezclas en caliente.

Una vez establecidos los parámetros para la mezcla como la temperatura de compactación y el porcentaje de asfalto se calientan los agregados para que de esta forma sea más fácil incorporar el asfalto líquido. El procedimiento para mezclar el asfalto y el agregado pétreo consiste en homogenizar los materiales hasta que el asfalto cubra completamente las partículas de los agregados siempre revisando la temperatura de mezcla para evitar el sobrecalentamiento del asfalto.

Una vez este realizada la mezcla, se deberá humectar los moldes de acero con diésel para que se facilite la extracción del espécimen, se colocara la mezcla asfáltica y se verificará que este en el rango de temperatura para compactación para proceder con una espátula a homogenizar la mezcla dándole 15 golpes en el centro del molde. Posteriormente se colocará en el martillo compactador donde se le darán 75 golpes por cara.

Figura 4.2

Briquetas de la mezcla asfáltica realizadas en la planta de la empresa EMULDEC.



Fuente: La imagen corresponde al martillo compactador usado para realizar briquetas de la mezcla asfáltica (2023).

Tabla 4.8

Tabla de porcentaje de mezcla de agregados.

N. Probeta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
% de Asfalto	5		5,5			6			6,5			7			

Fuente: La tabla fue obtenida de los resultados tabulados en el programa Excel.

4.3.4 Cálculo de las propiedades volumétricas de las briquetas

Una vez que se obtengan los pesos de las briquetas, se puede aplicar las ecuaciones mencionadas en el literal 4.2 para obtener las propiedades volumétricas de las briquetas. Las mismas permiten determinar el porcentaje óptimo de asfalto y las propiedades que la mezcla asfáltica tiene. Además de evaluar el desempeño de la mezcla usando el porcentaje óptimo de asfalto.

Para obtener el porcentaje óptimo de asfalto se deberán interpretar las gráficas resultantes de las propiedades volumétricas y los porcentajes de asfalto con los que se realizó la mezcla asfáltica.

Tabla 4.9

Tabla de propiedades volumétricas del ensayo Marshall para las briquetas.

PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS CON CADA PORCENTAJE DE ASFALTO									
% Asfalto	D. Bulk (Gb)	D. Agregado Total (Gsb)	D. Máx Teórica (Gmt)	D. Máx. Medida (Gmm)	D. Efectiva (Gse)	f/a	Porcentaje Vacíos (Vv)	V. agre	VAM
5,0	2,32	2,59	2,40	5,99	2,67	1,92	5,99	87,80	12,20
5,5	2,32	2,59	2,39	5,62	2,69	1,77	5,62	87,40	12,60
6,0	2,32	2,59	2,37	5,07	2,69	1,62	5,07	87,10	12,90
6,5	2,31	2,59	2,35	4,28	2,67	1,38	4,28	86,00	14,00
7,0	2,33	2,59	2,33	2,88	2,67	1,25	2,88	86,00	14,00

Fuente: La tabla fue obtenida de los resultados tabulados en el programa Excel.

Tabla 4.10

Tabla de resultados de estabilidad y flujo del ensayo Marshall para las briquetas.

Resultados Estabilidad y Flujo		
% Asfalto	Estabilidad	Flujo 0.01
5,0	2633	13
5,5	3249	13
6,0	2960	14
6,5	2169	20
7,0	2282	24

Fuente: La tabla fue obtenida de los resultados tabulados en el programa Excel.

CAPITULO 5

5.1 Análisis de resultados

5.1.1 Determinación del porcentaje óptimo de asfalto

Para tabular los resultados que se han obtenido posterior a la realización del ensayo Marshall, mismo que determina las propiedades volumétricas de las briquetas de la mezcla asfáltica que se realizaron con los distintos porcentajes de asfalto. Se podrán presentar los resultados en tablas y gráficos para de este modo obtener el porcentaje de asfalto optimo para la mezcla asfáltica.

Para poder determinar el porcentaje de asfalto optimo en la mezcla asfáltica es necesario tener en consideración la gráfica de Porcentaje de vacíos (Vv) vs Porcentaje de asfalto usado, de esta forma en la gráfica se coloca en el eje de las abscisas los porcentajes de asfalto usado y en el eje de las ordenadas se colocará el porcentaje de vacíos (Vv). El Asphalt Institute recomienda que el porcentaje óptimo de asfalto será el que se encuentre entre 3 y 5 por ciento del porcentaje de vacíos siendo así que el porcentaje de asfalto optimo se recomienda que se encuentre cercano a 4 por ciento.

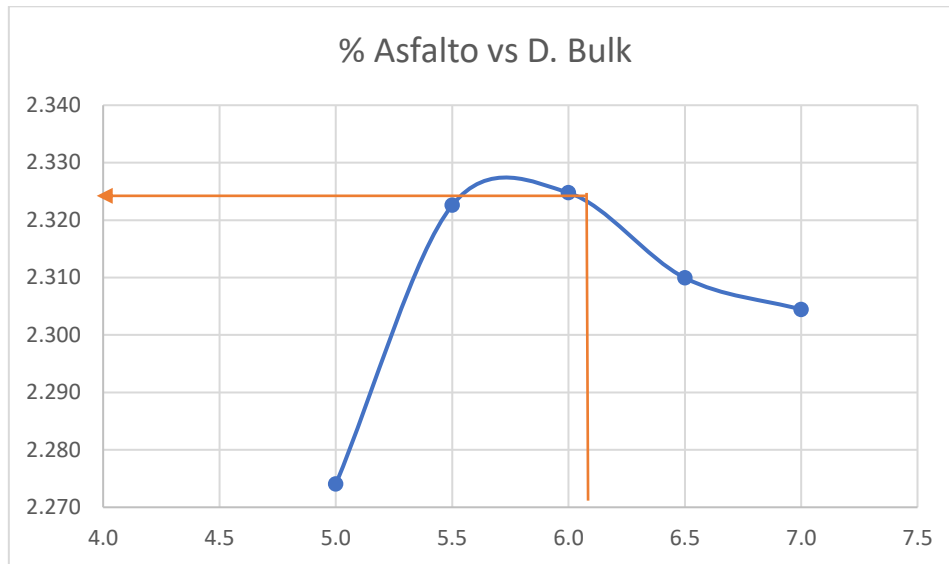
5.2 Determinación de las propiedades de la mezcla asfáltica con el porcentaje óptimo de asfalto

Una vez que se ha determinado el porcentaje óptimo de asfalto se deberán determinar las propiedades de la mezcla asfáltica que se ha elaborado con dicho porcentaje, para lo cual se debe realizar la graficas establecidas por el Asphalt Institute, que son porcentaje de asfalto vs Gravedad específica Bulk, estabilidad, flujo, VAM. Una vez obtenidas las gráficas se deberá

trazar una recta que pase por el porcentaje óptimo de asfalto e interseque con la gráfica y de esta forma se podrá obtener el valor que se proyecte en la ordenada.

Figura 5.1

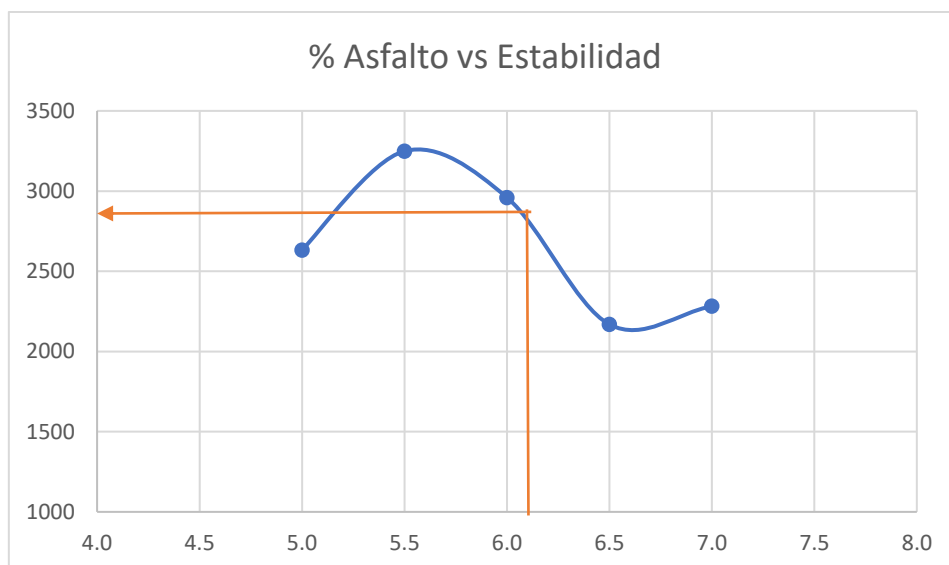
Grafica de Porcentaje de asfalto vs Gravedad Bulk



Fuente: La figura corresponde a los resultados obtenidos para obtener la densidad bulk en base al porcentaje de asfalto óptimo.

Figura 5.2

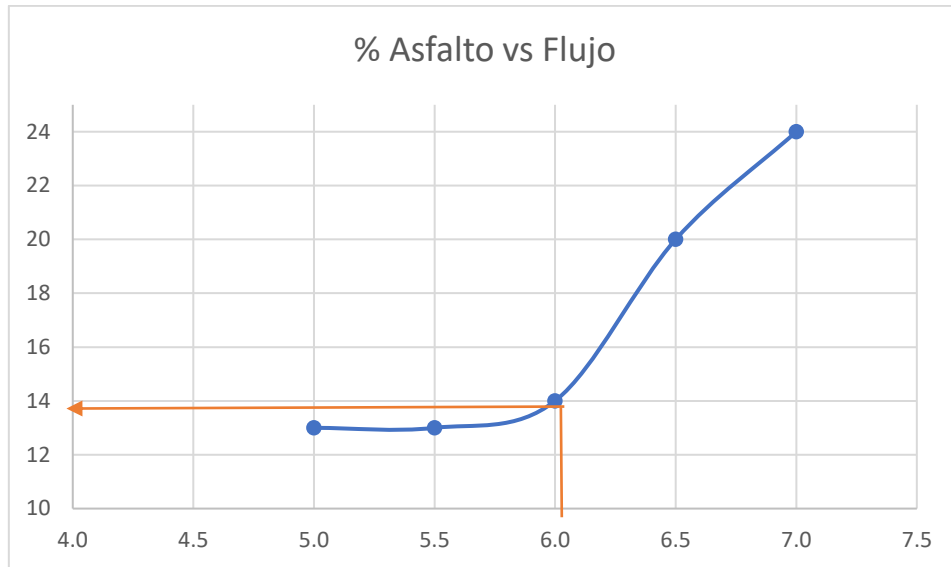
Grafica de Porcentaje de asfalto vs Estabilidad



Fuente: La figura corresponde a los resultados obtenidos para obtener la estabilidad en base al porcentaje de asfalto óptimo.

Figura 5.3

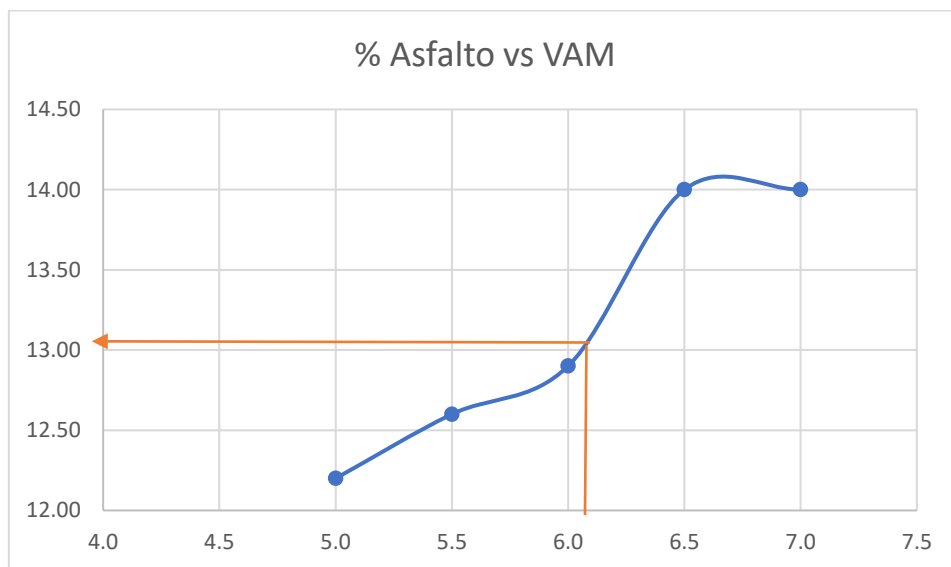
Grafica de Porcentaje de asfalto vs Flujo de mezcla



Fuente: La figura corresponde a los resultados obtenidos para obtener flujo en base al porcentaje de asfalto óptimo.

Figura 5.4

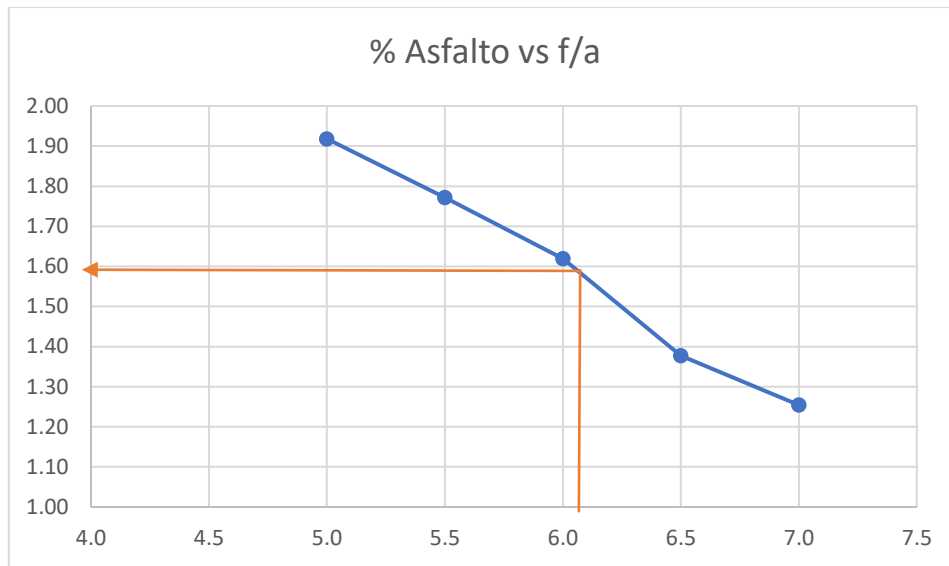
Grafica de Porcentaje de asfalto vs VAM



Fuente: La figura corresponde a los resultados obtenidos para obtener los vacíos de agregado mineral en base al porcentaje de asfalto óptimo.

Figura 5.5

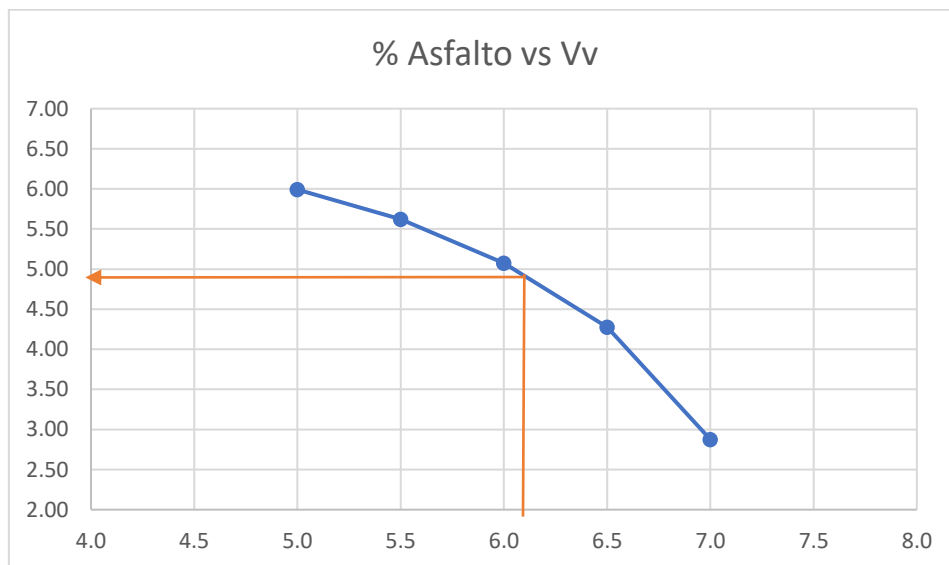
Grafica de Porcentaje de asfalto vs Relación filler/betún



Fuente: La figura corresponde a los resultados obtenidos para obtener la relación filler/betún en base al porcentaje de asfalto óptimo.

Figura 5.6

Grafica de Porcentaje de asfalto vs volumen de vacíos



Fuente: La figura corresponde a los resultados obtenidos para obtener el volumen de vacíos en base al porcentaje de asfalto óptimo.

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos de las graficas que se presentaron anteriormente, los mismos que serán comparados con las especificaciones de la normativa MOP-001-F 2002 para un tráfico muy pesado.

Tabla 5.1

Tabla de resultados con 6.1% de asfalto en comparación con las especificaciones del MOP.

Propiedades con 6.1% de asfalto	Unidad	Especificaciones MOP		
		Tráfico Muy Pesado		
		Resultado	Min	Max
G. E. Bulk	gr/ cm ³	2,325	-	-
Estabilidad	Lb	2900	2200	-
Flujo	plg/100	14	8	14
VAM	-	13,2	13	-
Porcentaje de vacíos	-	4,8	3	5
f/a	-	1,6	0,8	1,2

Fuente: La tabla fue obtenida de los resultados tabulados en el programa Excel.

CAPITULO 6

6.1 Conclusiones y recomendaciones

6.1.1 Conclusiones

- ✓ Mediante la determinación de las propiedades mecánicas del material pétreo y al compararlas con las especificaciones dadas por el MOP-001-F 2002, se puede observar que el material de la mina de piedra de vapor cumple con los parámetros establecidos en la norma. De tal forma que el material de la mina Piedra de vapor de Puerto Quito es apta para la elaboración de la mezcla asfáltica.
- ✓ Se puede observar en base a los resultados expuestos anteriormente, que el asfalto AC-20 que dispone de la empresa EMULDEC, cumple con lo establecido en la normativa MOP-001-F 2002. Por ende, el asfalto utilizado actúa como ligante para los agregados pétreos utilizados para la conformación de la mezcla asfáltica.
- ✓ En base a lo expuesto en los resultados de partículas alargadas, se puede observar que el material posee un alto porcentaje de partículas lajosas. De tal forma que en el proceso de compactación se fracturaba el agregado grueso lo que ocasionaba que se tenga mayor cantidad de vacíos, por ende, un valor elevado en flujo de mezcla.
- ✓ Al no tener una dosificación de los agregados previamente, se realizó 2 dosificaciones ya que como se mencionó anteriormente, el agregado pétreo posee un alto porcentaje de partículas alargadas. De esta forma se llegó a la conclusión que el porcentaje de agregado A y B, siendo A el agregado grueso $\frac{3}{4}$ y B el agregado N. 4, tengan los porcentajes de mezcla serán de 45% y 55% respectivamente.

- ✓ Como se mencionó anteriormente en el presente trabajo de integración curricular al no tener un diseño previo con el material de la mina Piedra de vapor, se ha determinado el porcentaje de asfalto óptimo en base a las gráficas estipuladas por el ASPHALT INSTITUTE de propiedades volumétricas vs % de asfalto, siendo correspondiente a 6,1% de cemento asfáltico.
- ✓ Una vez que se han obtenido las propiedades de la mezcla asfáltica y se lo comparó con el porcentaje de asfalto óptimo para la mezcla, se puede determinar que cumple con los parámetros establecidos por el MOP-001-F 2002 para el diseño de mezclas asfálticas para tráfico muy pesado, se ha verificado que cumple satisfactoriamente los valores de estabilidad, flujo, VAM y VAF.
- ✓ En base a lo mencionado en el presente trabajo de integración curricular, se ha podido determinar que las cantidades de mezcla de agregado correspondiente a 50% de agregado grueso $\frac{3}{4}$, 50% de agregado N.4 y 6.1% de asfalto óptimo no cumple con las especificaciones establecidas por la normativa MOP-001-F 2002, en especial en los valores de flujo y el porcentaje de vacíos en la mezcla, ya que los resultados obtenidos fueron superiores a los límites mínimos y máximos que menciona la norma.

6.1.2 Recomendaciones

- ✓ Una vez que se ha determinado el porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla asfáltica, se deberá elaborar 3 briquetas por cada porcentaje de asfalto y como se mencionó anteriormente se deberán realizar 2 porcentajes por arriba y 2 por abajo del porcentaje óptimo de asfalto. De esta forma se puede tener un promedio y un error menor en el caso de que una de las briquetas tenga resultados diferentes a las otras 2 briquetas realizadas con el mismo porcentaje de asfalto. O en su defecto se recomienda por lo menos realizar 2 briquetas por porcentaje ya que de esta forma se podrá realizar un análisis de los resultados.
- ✓ En base a que la mezcla con porcentajes 50% de agregado pétreo de $\frac{3}{4}$ y 50% de agregado N. 4 no obtuvo buenos resultados que cumplan con lo establecido por la normativa MOP-001-F 2002, se recomienda que se trabaje con la dosificación dada ya que de esta forma se puede asegurar el correcto desempeño de la mezcla asfáltica frente a un tráfico muy pesado.
- ✓ En el caso que se requiera el uso del material de la mina Piedra de Vapor para una mezcla asfáltica para una vía en la que se tenga un tráfico muy pesado, se recomienda el cambio del equipo de trituración por un equipo de trituración de cono, ya que la

mina Piedra de Vapor tiene un equipo de trituración de mandíbula, y para el correcto desempeño del agregado pétreo en conjunto con el cemento asfáltico se necesita que el agregado posea una forma más geométrica evitando que se tengan en gran cantidad partículas alargadas y planas lo que perjudica al desempeño de la mezcla asfáltica.

- ✓ En el presente trabajo de titulación se pudo evidenciar la calidad del cemento asfáltico que se trabaja en el país, por lo que se recomienda para un próximo trabajo de integración curricular se pueda realizar el mismo diseño, pero esta vez con el uso de un cemento asfáltico modificado con polímero o en su lugar que sea un asfalto normalizado y se comparen los resultados obtenidos con el presente trabajo y con los parámetros establecidos en la norma MOP-001-F 2002.
- ✓ A pesar de los resultados, se recomienda el uso del diseño de la mezcla para vías que posean un tráfico muy pesado como pueden ser las cercanas a la cantera que es la Calacalí - La Independencia teniendo en cuenta las recomendaciones dadas anteriormente.
- ✓ Es recomendado el uso de equipo de protección personal durante todo el proceso de la elaboración del diseño de la mezcla asfáltica, ya que en todas las etapas el operador corre riesgos que pueden ser perjudiciales para la salud de este.
- ✓ Se recomienda que se utilice equipos en buenas condiciones, además de cerciorarse de que los equipos con los que se trabajan estén calibrados y puedan ser comprobados o respaldados por una certificación de calibración.

BIBLIOGRAFIA

Alamilla, H. (2020). Diseño de mezclas asfálticas densas en caliente en función del nivel del tránsito. México (p. 21).

Asphalt Institute. (2001). Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica En caliente MS-22. <https://es.scribd.com/document/66112307/MS-22-Principios-de-Construccion-de-Pavimentos-de-Mezcla-Asfalticas>

Asphalt Institute. (2007). The asphalt handbook 7th ed (7th ed.).
<https://my.asphaltinstitute.org/Shop/Product-Details?productid=9E5A6840-361B-E811-80F2-000D3A011CEC>

ASTM Institucional. (2010). Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens).

ASTM Institucional. (2018a). Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method).

ASTM Institucional. (2018b). Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials.

ASTM Institucional. (2018c). Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus).

ASTM International. (2014). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.

<https://doi.org/10.1520/C0131>

ASTM International. (2015a). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and

Absorption of Coarse Aggregate. <https://doi.org/10.1520/C0127-15>

ASTM International. (2015b). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and

Absorption of Fine Aggregate. <https://doi.org/10.1520/C0128-15>

ASTM International. (2018). Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. https://doi.org/10.1520/C0088_C0088M-18

ASTM International. (2019). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19

Ministerio de obras públicas y conexiones. (2002). Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes. Ecuador (p. 285, 298, 683, 669).

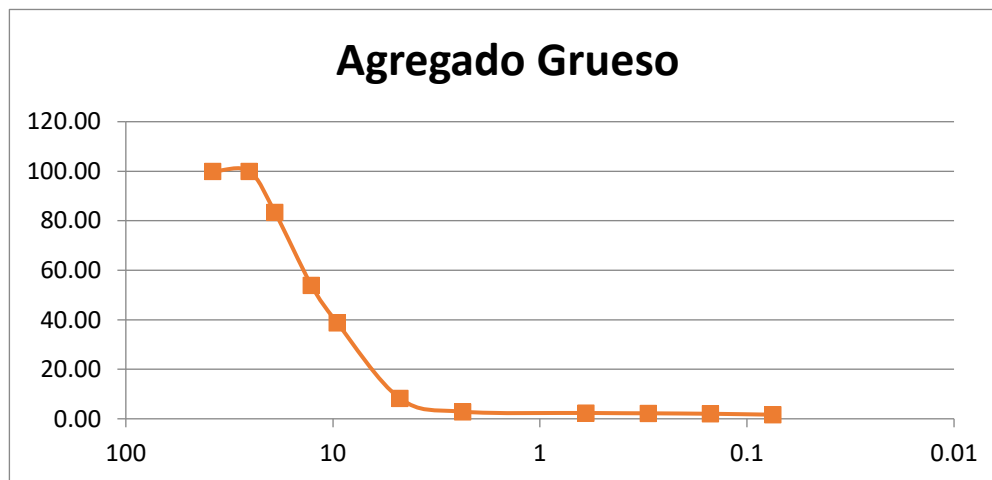
Miranda, N. (2016). *Verificación del diseño Marshall para MDC-19 (Rodadura) para un tránsito de categoría NT2, a partir de agregados pétreos obtenidos de la trituración de material crudo del río | ubicado en el municipio de Coello Tolima, cumpliendo invias 2013 [Tesis de especialización, Universidad Nueva Granada], Colombia.*

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiVwbSjzILAhV_kIQIHTBMC6oQFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Frepository.unimilitar.edu.co%2Fbitstream%2Fhandle%2F10654%2F15941%2FMirandaDonatoNestorIvan2016.pdf%3Fsequence%3D2%26isAllowed%3Dy&usg=AOvVaw2Z5h0qXODFHnTKOPCzeF5Q

ANEXOS

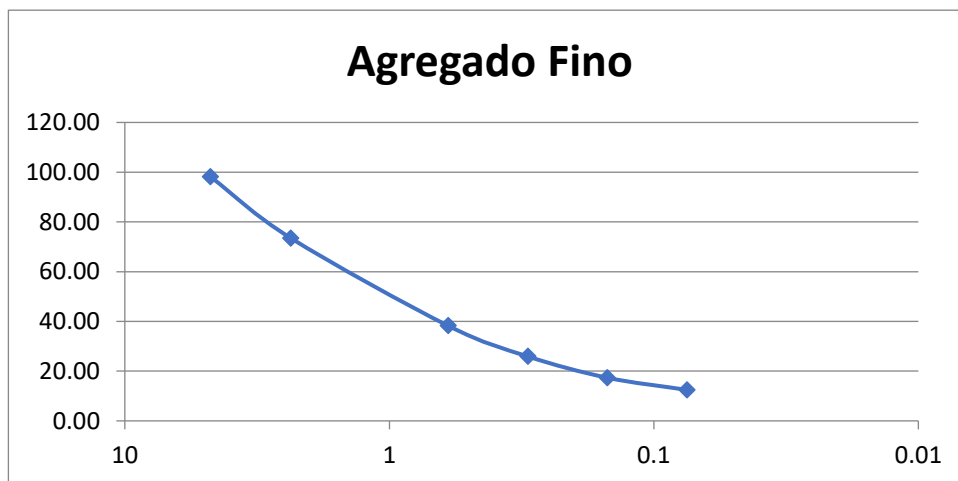
Anexo 1: Granulometría Agregado Grueso 3/4

AGREGADO GRUESO 3/4					
TAMIZ	TAMAÑO (mm)	masa retenida parcial (Kg)	masa retenida acumulada (kg)	%retenido acumulado	%Pasante acumulado
1 1/2	38,1	0	0	0,00	100,00
1	25,4	0	0	0,00	100,00
3/4	19,05	333,37	333,37	16,62	83,38
1/2	12,7	590,64	924,01	46,07	53,93
3/8	9,54	302,35	1226,36	61,15	38,85
4	4,75	613,11	1839,47	91,72	8,28
8	2,36	108,33	1947,8	97,12	2,88
30	0,6	10,2	1958	97,63	2,37
50	0,3	2,89	1960,89	97,78	2,22
100	0,15	3,78	1964,67	97,96	2,04
200	0,075	7,38	1972,05	98,33	1,67
bandeja		33,46	2005,51	100,00	0,00



Anexo 2: Granulometría agregado N. 4

AGREGADO FINO N. 4					
TAMIZ	TAMAÑO (mm)	masa retenida parcial (Kg)	masa retenida acumulada (kg)	%retenido acumulado	%Pasante acumulado
4	4,75	36,17	36,17	1,80	98,20
8	2,36	495,26	531,43	26,49	73,51
30	0,6	707,18	1238,61	61,74	38,26
50	0,3	247,45	1486,06	74,07	25,93
100	0,15	172,06	1658,12	82,65	17,35
200	0,075	98,1	1756,22	87,53	12,47
bandeja		250,09	2006,31	100,00	0,00



Anexo 3: Resultados ensayos de laboratorio para el control de calidad del asfalto proporcionado por EMULDEC.

CONTROL DE CALIDAD									
Fecha de toma de muestra:	2023-01-31	Norma de referencia:	NTE INEN 2515. Emenda 1						
Fecha inicio de los ensayos:	2023-01-31	Fecha fin de los ensayos:	2023-01-31						
REQUISITOS									
Ensayo	Norma de Ensayo	Unidad	Mínimo	Máximo	Valor	Resultado			
Punto de Inflamación Cleveland	NTE INEN 808	° C	232	-	260	SI			
Gravedad Específica 25°C/25°C	NTE INEN 923	g/cm ³	1	-	1.004	SI			
Punto de Ablandamiento R&B	ASTM D 36	° C	48	-	49.0	SI			
Penetración a 25°C, 100g, 5 s	ASTM D 5	1/10 min	60	70	90.7	NO			
Índice de Penetración	ASTM D 5/DSM	1/10 min	-1.5	1.0	0.10	SI			
Viscosidad Absoluta, 60 °C	NTE INEN 810	Pa.s	160	240	236.0	SI			
Viscosidad Cinemática a 135°C	ASTM 2170	mm ² s ⁻¹	300	-	383.40	SI			
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min	NTE INEN 916	cm	100	-	118.00	SI			
Viscosidad Brookfield 135 °C; SC4-21; 20RPM	ASTMM D 2196	cP	300	-	385.0	SI			
Viscosidad Brookfield 140 °C; SC4-21; 20RPM	ASTMM D 2196	cP	200	-	295.0	SI			
Viscosidad Brookfield 145 °C; SC4-21; 20RPM	ASTMM D 2196	cP	150	-	240.0	SI			
OBSERVACIONES									
El material no cumple con lo especificado para el Ensayo de Penetración.									