

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA: EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL MÉTODO MARSHALL CON MATERIAL DE LA MINA CAIZAN CHICO 2 UBICADA EN LA PARROQUIA DE TUMBACO CON ASFALTO AC-

20

AUTOR:

CARLOS ALEJANDRO IDROVO AGUILERA

QUITO DM, JULIO DE 2025

Dedicatoria,

Primeramente, quiero dedicar este trabajo a Dios porque el es quien me permitió poder estar aquí cumpliendo mis metas, dándome su bendición día a día y regalándome a tantas personas que me aman y me cuidan como lo es mi familia.

Me gustaría dedicar este trabajo a las personas que me han apoyado la vida entera y son mis Padres, Carlos Julio Idrovo y Mayra Alejandra Aguilera, decirles que gracias a su amor, paciencia y confianza es que eh podido llegar a donde estoy. Siempre estuvieron ahí para enseñarme sobre el mundo, me dieron su confianza y apoyo en cada decisión importante que tenía que tomar en mi vida y sin importar nada fue su prioridad que yo pudiera cumplir mis sueños por eso los llevo en mi mente y corazón en cada paso que doy día a día, siempre voy a estar agradecido por sus enseñanzas y cariño.

Me gustaría también dedicar este trabajo a la persona mas especial de mi vida, Melany Jhaela quien me ha acompañado desde el primer semestre de la universidad y me enseñó lo poderoso que puede ser la influencia de una persona al cambiar mi forma de pensar respecto a muchísimas cosas ella me demostró que con su lealtad, amor y confianza puedo hacer cualquier cosa que me proponga. Sin duda no hay otra persona a quien elegiría para compartir mi vida, me enseñó que este sentimiento es como el instinto que Dios nos envió para hacer un mundo más bello, yo jure quererte ante Dios jamás me arrepiento mientras haya luz en el sol te amare. (Quiero Saber de ti)

Agradecimientos,

Primeramente, quiero darle las gracias a mi mamá, Mayra Aguilera por todo el apoyo que me dio en el transcurso de la carrera siempre estuvo ahí para ayudarme sin importar las dificultades, jamás me dejo darme por vencido y por eso mamita te doy las gracias.

Quiero agradecer también a mi papá que estuvo ahí para darme consejos y guiarme por el mejor camino en toda esta carrera universitaria, su sabiduría me ayudo a salir de muchos problemas y por eso quiero darle las gracias.

Quiero agradecer a mi novia, Melany Jhaela por haber estado ahí conmigo en cada deber, cada trabajo por quedarse estudiando para cada examen sin importar la hora ni las circunstancias, es gracias a su valioso apoyo que me volví una persona más responsable y por eso te doy las gracias.

Quiero agradecer a mis abuelitos Magdalena Realpe y Marcelo Aguilera, por que fueron ellos los que desde pequeño me enseñaron sobre el amor, el cariño y a tener siempre a mi familia como lo mas importante en el mundo, ellos me cuidaron desde el primer día y han sido mis confidentes y consejeros en todo lo que no sabia como decirles a mis padres ellos son la representación perfecta de que uno en la vida puede tener mas de un papá y una mamá y por todo eso les agradezco.

Quiero Agradecer a mis Tíos, Marcelo Aguilera, Ana Aguilera, Juan Fiscal, Cristina Arias por haberme apoyado, ellos me enseñaron que sin importar lo lejos que puedan vivir, siempre cuento con ellos como si todos estuviéramos en un mismo lugar, cada uno a su manera, me enseñó sobre responsabilidad, cariño y dedicación que uno debe tener sin perder de vista lo que es realmente importante en la vida y es la familia.

Quiero Agradecer a mis primos, Josué Fiscal, Melanny Fiscal, Camilo Aguilera me han demostrado siempre su cariño, me han sabido comprender cuando eh tenido un problema, me han regalado momentos de diversión, risas, y compañía por lo que siempre los voy a considerar mis hermanos y por eso les doy las gracias.

Me gustaría Agradecer a mis amigos, las personas que han estado ahí en muchos momentos importantes, para divertirnos, estudiar o incluso apoyándonos en problemas, son personas a las que les agradezco mucho su apoyo y espero seguir con esa amistad, Crithian Erazo, Victoria Gonzales, Wilson Vásquez, Gustavo Tituaña, Sarahi Changuan, Alan Vargas, Cristian Oscullo, David Cabrera, Ronny Gallardo y Dylan Paucar. Me enseñaron que la lealtad viene de ambas partes.

Por último, Quisiera agradecer al Ingeniero Gustavo Yánez por haberme apoyado con este proyecto, por brindarme su guía, y sobre todo su tiempo.

Carlos Idrovo A.

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	9
1. Introducción.....	9
1.1 Justificación.....	9
1.2 Planteamiento del problema.....	9
1.3 Objetivos.....	9
1.3.1 Objetivo general.....	9
1.3.2 Objetivos específicos.....	9
CAPÍTULO II.....	10
2. Marco Teórico.....	10
2.1 Materiales pétreos.....	10
2.1.1 Definición.....	10
2.1.2 Propiedades y características.....	10
2.1.3 Procedencia de los agregados.....	11
2.2 Cemento asfáltico.....	12
2.2.1 Definición.....	12
2.2.2 Propiedades y características.....	12
2.2.3 Procedencia del cemento asfáltico.....	13
2.3 Mezclas asfálticas.....	13
2.3.1 Definición.....	13
CAPÍTULO III.....	14
3. Ensayo de materiales.....	14
3.1 Ensayos de material pétreo.....	14
3.1.1 Análisis granulométrico (ASTM C136/C136M – 19).....	15
3.1.2 Gravedad específica y porcentaje de absorción.....	15
3.1.2.1 Agregado grueso (ASTM C127 – 15).....	16
3.1.2.2 Agregado fino (ASTM C128 – 15).....	17
3.1.3 Equivalente de arena del agregado fino (ASTM D2419 – 14).....	18
3.1.4 Desgaste por abrasión del agregado grueso en máquina de los ángeles (ASTM C131/C131M-14).....	18
3.1.5 Durabilidad del agregado grueso a la acción de los sulfatos (ASTM C88/C88M – 18).....	20
3.1.6 Tabla de resultados.....	20
3.2 Ensayos del cemento asfáltico.....	21
3.2.1 Gravedad específica (ASTM D70 – 17).....	21
3.2.2 Viscosidad cinemática (ASTM D2170/D2170 M10).....	22

3.2.3	Penetración (ASTM D5/D5M – 19a).....	23
3.2.4	Punto de ablandamiento (ASTM D36/D36M – 14).....	24
3.2.5	Ductilidad (ASTM D113 – 17).....	25
3.2.6	Tabla de resultados	26
CAPÍTULO IV		27
4.	Diseño de mezclas asfálticas	27
4.1	Diseño de mezclas asfálticas según el método Marshall.....	27
4.2	Propiedades volumétricas.....	28
4.3	Estabilidad y flujo Marshall	32
4.4	Cálculos de la mezcla asfáltica.....	36
4.4.1	Dosificación de la mezcla del agregado.....	36
4.4.2	Determinación del porcentaje teórico de asfalto.....	38
4.4.3	Elaboración de briquetas para el ensayo	40
4.4.4	Cálculo de las propiedades volumétricas de las briquetas	42
CAPÍTULO V		43
5.	Análisis de resultados	43
5.1	Determinación del porcentaje óptimo de asfalto.....	43
5.2	Determinación de las propiedades de la mezcla asfáltica con el porcentaje óptimo de asfalto	44
CAPÍTULO VI		47
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	47
6.1	Conclusiones	47
6.2	Recomendaciones.....	48
Bibliografía.....		49
Anexos.....		51

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1 Ubicación de la mina Caizan Chico 2	11
Ilustración 2-2 Recolección del material pétreo	12
Ilustración 2-3 Tabla de especificaciones del asfalto	13
Ilustración 3-1 Tabla de especificaciones para la carga de máquina de Los Ángeles....	19
Ilustración 3-2 Gradación de las muestras de ensayo.....	19
Ilustración 3-3 Picnómetro con tapón y asfalto	22
Ilustración 3-4 Viscosímetro	23
Ilustración 3-5 Picnómetro manual.....	24
Ilustración 3-6 Ensayo anillo y bola	25
Ilustración 3-7 Ensayo de ductilidad	26
Ilustración 4-1 Especificaciones para una mezcla asfáltica.....	33
Ilustración 4-2 Factores de corrección de estabilidad	34
Ilustración 4-3 Briquetas sumergidas para ensayo Marshall.....	35
Ilustración 4-4 Briqueta en la máquina de ensayo.....	35
Ilustración 4-5 Tabla 405-5.1 Porcentajes de material que pasa por abertura de tamiz .	36
Ilustración 4-6 Curva granulométrica de la mezcla propuesta	38
Ilustración 4-7 Elaboración de baches.....	40
Ilustración 4-8 Elaboración de mezcla asfáltica	41
Ilustración 4-9 Compactador Marshall	42
Ilustración 4-10 Briquetas compactadas para ensayarlas	42
Ilustración 5-1 Gráfica V _v vs % de Asfalto	43
Ilustración 5-2 Gráfica de gravedad específica Bulk vs % de Asfalto	44
Ilustración 5-3 Gráfica de estabilidad vs % de Asfalto	45
Ilustración 5-4 Gráfica de flujo vs % de Asfalto	45
Ilustración 5-5 Gráfica de VAM vs % de Asfalto	46
Ilustración 5-6 Gráfica f/a vs % de Asfalto	46

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3-1 Gravedad específica Bulk.....	16
Ecuación 3-2 Gravedad específica saturada con superficie seca.....	16
Ecuación 3-3 Gravedad específica aparente.....	16
Ecuación 3-4 Porcentaje de absorción.....	16
Ecuación 3-5 Gravedad específica Bulk.....	17
Ecuación 3-6 Gravedad específica saturada con superficie seca.....	17
Ecuación 3-7 Gravedad específica aparente.....	17
Ecuación 3-8 Porcentaje de absorción.....	17
Ecuación 3-9 Equivalente de arena de agregado fino.....	18
Ecuación 3-10 Gravedad específica	22
Ecuación 4-1 Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica	29
Ecuación 4-2 Gravedad específica Bulk del agregado total	29
Ecuación 4-3 Gravedad específica aparente del agregado total	29
Ecuación 4-4 Gravedad específica máxima teórica.....	29
Ecuación 4-5 Gravedad específica máxima medida (Rice).....	30
Ecuación 4-6 Gravedad específica efectiva del agregado	30
Ecuación 4-7 Asfalto Absorbido	30
Ecuación 4-8 Asfalto efectivo de la mezcla	31
Ecuación 4-9 Filler / Asfalto	31
Ecuación 4-10 Porcentaje de vacíos con aire	31
Ecuación 4-11 Porcentaje del volumen de agregado vs volumen total	31
Ecuación 4-12 Porcentaje de vacíos del agregado mineral	32
Ecuación 4-13 Porcentaje de asfalto teórico del Asphalt Institute	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Resultados del agregado grueso	20
Tabla 3-2 Resultados del agregado medio.....	21
Tabla 3-3 Resultados del agregado fino	21
Tabla 3-4 Tabla de resultados de los ensayos del Asfalto AC-20	27
Tabla 4-1 Porcentajes de dosificación del agregado para la mezcla asfáltica propuesta	37
Tabla 4-2 Cantidad de peso por cada tamiz de la mezcla propuesta	37
Tabla 4-3 Cálculo del parámetro F	39
Tabla 4-4 Porcentaje teórico de Asfalto	39
Tabla 4-5 Tabla de porcentaje de asfalto de cada briqueta.....	42
Tabla 5-1 Tabla resumen de verificación de datos con especificaciones del MTOP de tráfico muy pesado.....	47

CAPÍTULO I

1. Introducción

1.1 Justificación

Este trabajo de integración curricular tiene como importancia el correcto diseño de una mezcla asfáltica para pavimentos flexibles utilizados en la construcción de vías. Es necesario seguir las normas establecidas en el MOP-001-F 2002, que incluyen parámetros como la estabilidad y el flujo, estos son fundamentales para asegurar que la capa de rodadura se comporte de manera adecuada, garantizando que sea flexible y resistente a lo largo de su vida útil sin sufrir fallas.

Además, es importante utilizar los porcentajes correctos de los materiales que forman la mezcla asfáltica. Para el presente trabajo, se utilizarán los materiales extraídos de la mina Caizan Chico 2, se realizarán los ensayos para comprobar que cumplan con los requisitos necesarios para obtener una mezcla asfáltica óptima. Así, se asegura que la carretera sea duradera, funcional y segura para el tipo de tráfico diseñado.

1.2 Planteamiento del problema

El presente trabajo de integración curricular tiene como objetivo analizar si los porcentajes de los agregados y el asfalto que utilizan los contratistas en el medio son los apropiados para obtener una mezcla asfáltica que cumpla con los estándares de propiedades volumétricas, estabilidad y flujo establecidos en la normativa de Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F 2002 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Por lo tanto, se llevará a cabo una examinación sobre la calidad de los agregados pétreos extraídos de la mina Caizan Chico 2, para asegurar que cumplan con los mínimos requisitos para poder ser utilizados en mezclas asfálticas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Evaluar una mezcla asfáltica por el método Marshall con material de la mina Caizan Chico 2 ubicada en Tumbaco con asfalto AC-20.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades mecánicas y físicas de los materiales pétreos de la mina Caizan Chico 2 y del cemento asfáltico.

- Definir los porcentajes de los agregados pétreos y asfalto para la mezcla asfáltica con el Método Marshall.
- Analizar y presentar los resultados relacionados con el diseño de la mezcla asfáltica.

CAPÍTULO II

2. Marco Teórico

2.1 Materiales pétreos

2.1.1 *Definición*

Los materiales pétreos o también conocidos como agregados minerales son partículas de roca natural, triturada o grava que constituyen la mayor parte, es decir entre un 90% a un 95% del volumen de la mezcla dependiendo del diseño que se realiza. Estos materiales, deben garantizar un buen desempeño dentro de la mezcla asfáltica por lo que deben cumplir con ciertos requisitos y características de calidad específicos en cuanto a su tamaño, forma, resistencia mecánica, dureza, limpieza y capacidad de adherencia al ligante asfáltico. Es importante considerar que deben ser totalmente libres de material orgánico y además duros y con superficie irregular para garantizar la adherencia con el cemento asfáltico.

2.1.2 *Propiedades y características*

El material pétreo que va a ser utilizado en la mezcla asfáltica, tanto el fino, medio como el grueso deben pasar ciertos requisitos, para lo cual es necesario realizarles los ensayos especificados en la MTOP – 001F 2002. Los resultados de los ensayos permiten determinar las propiedades y características del material pétreo. Los ensayos por realizarse son los siguientes:

- Granulometría
- Gravedad específica
- Abrasión
- Porosidad
- Equivalente de arena
- Resistencia a los sulfatos

2.1.3 Procedencia de los agregados

Los agregados pétreos para la mezcla asfáltica se dividen en tres conforme a la información dada por el MTOP, 2002, a continuación, se detalla:

- Agregado grueso: agregado en el cual las partículas son retenidas por el tamiz N°4 (4.75mm).
- Agregado intermedio o arena: material del cual sus partículas pasan por el tamiz N°4 (4.75mm) y son retenidas por el tamiz N°200 (0.075mm).
- Relleno mineral o agregado fino: todo material que sus partículas pasan por el tamiz N°200 (0.075mm).

Los agregados pétreos para el presente trabajo de integración curricular se extrajeron de la mina Caizan Chico 2, ubicada en la parroquia de Tumbaco y luego fue trasladado de manera personal a los laboratorios de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador para la realización de los respectivos ensayos. A continuación, se presenta la ubicación en Google Earth de la Mina Caizan Chico 2.



Ilustración 2-1 Ubicación de la mina Caizan Chico 2



Ilustración 2-2 Recolección del material pétreo

2.2 Cemento asfáltico

2.2.1 Definición

El cemento asfáltico es un material ligante hidrocarbonado de color negro, de consistencia sólida o semisólida, proveniente de la refinación del petróleo. Se utiliza en la elaboración de mezclas asfálticas y debe cumplir con las especificaciones técnicas de viscosidad, ductilidad, punto de ablandamiento, penetración y otras propiedades físicas y químicas que garanticen su desempeño en pavimentos. (MTO, 2002, p. 400-1).

2.2.2 Propiedades y características

Se deben realizar ensayos de laboratorio para obtener las propiedades y características del cemento asfáltico, estos ensayos se encuentran normados según la INEN o AASHTO, además deben cumplir con lo indicado en la tabla 810 – 2.1 del MOP – 001F – 2002 que se encuentra a continuación:

ENSAYOS	60-70		85-100	
Betún original	mínimo	máximo	mínimo	máximo
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

Ilustración 2-3 Tabla de especificaciones del asfalto

Fuente: (Tabla 810.2.1 MTOP, 2002)

Para determinar las propiedades físicas y cumplir con los parámetros establecidos se realizarán los ensayos especificados a continuación:

- Penetración
- Punto de ablandamiento
- Ductilidad
- Viscosidad

2.2.3 Procedencia del cemento asfáltico

Para el análisis del cemento asfáltico para usarse en la mezcla asfáltica se va a tomar un asfalto AC – 20 clasificado según la norma INEN 2515, este fue adquirido de la planta asfáltica Naranjo López que se encuentra localizada en la troncal de la Sierra E35 vía Pifo.

2.3 Mezclas asfálticas

2.3.1 Definición

Una mezcla asfáltica es una combinación de agregados pétreos y un ligante bituminoso, en este caso el cemento asfáltico. Esta mezcla forma una capa continua, resistente e impermeable que proporciona soporte estructural, durabilidad, y resistencia frente al tráfico, la deformación y el agua. Dependiendo de la temperatura de fabricación y

colocación, las mezclas asfálticas se clasifican en mezclas en caliente, templadas o en frío, siendo la más común la mezcla en caliente, utilizada ampliamente en obras viales. Según el MTOP (2002), este tipo de mezcla debe cumplir con criterios específicos de granulometría, contenido de ligante y propiedades volumétricas para asegurar su correcto desempeño.

Existen diferentes métodos de mezclas asfálticas, en el presente trabajo de integración curricular se utilizará el método Marshall, el cual determina el contenido óptimo de asfalto a través de ensayos que evalúan parámetros como la estabilidad, fluencia, vacíos de aire, y vacíos llenos de asfalto. En este procedimiento, se moldean especímenes cilíndricos que se compactan y luego se ensayan aplicándoles una carga de compresión a temperatura controlada hasta alcanzar la falla. Estos resultados permiten seleccionar una mezcla que equilibre resistencia, flexibilidad y durabilidad, garantizando un pavimento con buen comportamiento ante las cargas repetidas y las variaciones climáticas (Asphalt Institute, 2007).

CAPÍTULO III

3. Ensayo de materiales

3.1 Ensayos de material pétreo

Los agregados pétreos deben cumplir con las necesidades estructurales y funcionales de la mezcla asfáltica para lo cual se determinarán las características y propiedades mecánicas de los tres agregados, fino, medio y grueso, determinados por las diferentes composiciones granulométricas.

El Asphalt Institute afirma que:

El agregado ideal tiene el tamaño de partículas y clasificación adecuados, es fuerte y resistente y consiste en partículas angulares, casi 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)

Para obtener la mezcla asfáltica óptima es necesario realizar algunos ensayos normados por la ASTM y la INEN a los agregados para determinar las propiedades mecánicas de los mismos.

3.1.1 Análisis granulométrico (ASTM C136/C136M – 19)

El análisis granulométrico es muy necesario en el estudio de los agregados pétreos, ya que permite determinar la distribución de tamaño de las partículas en una muestra, clasificándolas en finas, intermedias y gruesas.

El método utilizado corresponde a la norma ASTM C136/C136M – 19, en la cual se indica el procedimiento estándar para realizar la separación del material mediante los tamices con aberturas normalizadas. El ensayo consiste en tomar una muestra del agregado previamente secado y someterla a un proceso de tamizado en una columna de tamices que se encuentran ubicados de manera descendente, desde la malla de mayor hasta la de menor abertura.

El material retenido en cada tamiz permite generar la curva granulométrica, que es una herramienta gráfica utilizada para visualizar y analizar la proporción de partículas según su tamaño y de esta manera clasificar los agregados como gruesos o finos.

A partir del análisis de la curva granulométrica y los porcentajes retenidos y pasantes, se puede ir ajustando la proporción de materiales que serán utilizados para la realización de las briquetas. Además, este análisis permite verificar el cumplimiento con las especificaciones técnicas del Ministerio de Obras Públicas del Ecuador (MOP 001-F, 2002), que establece rangos granulométricos mínimos y máximos aceptables para los materiales empleados en obras viales.

3.1.2 Gravedad específica y porcentaje de absorción

Este ensayo se realiza conforme a lo establecido en las normas ASTM C127 (para agregados gruesos) y ASTM C128 (para agregados finos). La gravedad específica, también denominada densidad relativa se define como la relación entre la masa del agregado y la masa de un volumen equivalente de agua a una temperatura estándar. Esta propiedad permite caracterizar la densidad del agregado respecto a la del agua, y es esencial para el diseño de mezclas asfálticas.

Por otro lado, el porcentaje de absorción representa el incremento de masa que experimenta una muestra de agregado al pasar del estado seco al estado saturado con superficie seca. Este valor se relaciona con la porosidad del agregado.

3.1.2.1 Agregado grueso (ASTM C127 – 15)

De acuerdo con la norma ASTM C127 – 15, se determina la gravedad específica y el porcentaje de absorción de agregado grueso y medio mediante el uso de métodos gravimétricos, a continuación, se muestra sus ecuaciones:

- Ge: Gravedad específica Bulk:

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

Ecuación 3-1 Gravedad específica Bulk

- Ges: Gravedad específica saturada con superficie seca

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

Ecuación 3-2 Gravedad específica saturada con superficie seca

- Gea: Gravedad Específica aparente

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

Ecuación 3-3 Gravedad específica aparente

- % Ab: Porcentaje de absorción

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

Ecuación 3-4 Porcentaje de absorción

Donde:

A = masa de la muestra de ensayo secada al horno. (gr)

B = masa de la muestra de ensayo saturada con superficie seca. (gr)

C = masa aparente de la muestra de ensayo saturada en agua. (gr)

(ASTM International, 2019b)

3.1.2.2 Agregado fino (ASTM C128 – 15)

Para agregados finos, la norma ASTM C128 – 15 establece dos métodos: el gravimétrico y el volumétrico. En este caso, se ha empleado el método gravimétrico utilizando un picnómetro, el cual permite determinar con precisión la gravedad específica y el porcentaje de absorción mediante las siguientes ecuaciones:

- Ge: Gravedad específica Bulk

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

Ecuación 3-5 Gravedad específica Bulk

- Ges: Gravedad específica saturada con superficie seca

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

Ecuación 3-6 Gravedad específica saturada con superficie seca

- Gea: Gravedad Específica aparente

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

Ecuación 3-7 Gravedad específica aparente

- % Ab: Porcentaje de absorción

$$\%Ab = \left[\frac{(S - A)}{A} \right] * 100$$

Ecuación 3-8 Porcentaje de absorción

Donde:

A = masa de la muestra de ensayo secada al horno. (gr)

B = masa del picnómetro lleno de agua, hasta la marca de calibración. (gr)

C = masa picnómetro lleno de la muestra y agua hasta la marca de calibración. (gr).

S = masa de la muestra saturada con superficie seca. (gr)

(ASTM International, 2019c)

3.1.3 Equivalente de arena del agregado fino (ASTM D2419 – 14)

El ensayo equivalente de arena tiene como finalidad evaluar la limpieza del agregado fino, específicamente la proporción de partículas plásticas o arcillosas presentes en una muestra que ha pasado por el tamiz No. 4 (4,75 mm). Este procedimiento está normado por la ASTM D2419 – 14, la cual establece el método para determinar el porcentaje relativo de partículas de arena frente al agregado fino.

El principio del ensayo se basa en la sedimentación diferencial de partículas en una solución estándar. Se deja en reposo el agregado fino con la solución, las partículas más densas (arena) sedimentan más rápidamente, mientras que las partículas más finas (como arcillas o limos) permanecen en suspensión por más tiempo. La proporción entre estos dos niveles se utiliza para calcular el índice de equivalente de arena (SE), que sirve como indicador de la calidad del agregado en términos de su limpieza. Se debe considerar que si el valor es alto significa que se tiene un buen material.

La ecuación utilizada para determinar este valor es:

$$SE = \left(\frac{A}{B}\right) * 100$$

Ecuación 3-9 Equivalente de arena de agregado fino

Donde

A = lectura de arena (sedimento)

B = lectura de arcilla (suspensión)

(ASTM International, s. f.)

3.1.4 Desgaste por abrasión del agregado grueso en máquina de los ángeles (ASTM C131/C131M-14)

Este ensayo, estandarizado bajo la norma ASTM C131/C131M – 14, tiene como objetivo determinar la resistencia al desgaste y a la degradación mecánica de los agregados gruesos

sometidos a abrasión. El ensayo permite evaluar el comportamiento del agregado ante cargas dinámicas y repetitivas.

El procedimiento consiste en introducir una muestra de agregado previamente secado, junto con un número específico de esferas de acero denominados los cuerpos abrasivos, dentro de un tambor de acero giratorio conocido como máquina de Los Ángeles. La máquina realiza giros controlados simulando las condiciones de desgaste mecánico por fricción y choque que los agregados experimentarían en campo.

Según la norma ASTM, los agregados utilizados en este ensayo deben tener un tamaño máximo menor a 1 ½ pulgadas (37,5 mm). El número de esferas y la carga sometida serán de acuerdo con las siguientes tablas:

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

Ilustración 3-1 Tabla de especificaciones para la carga de máquina de Los Ángeles

Fuente: (ASTM C131, 2014)

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

Ilustración 3-2 Gradación de las muestras de ensayo

Fuente: (ASTM C131, 2014)

En el presente trabajo de integración curricular la clasificación fue de gradación B, por lo cual se va a utilizar 11 esferas y una masa del material de 5 000 gramos como se puede ver en la anterior tabla presentada. Con los datos se procede a introducir la muestra y las esferas en el tambor de la máquina de Los Ángeles y someterles a 500 revoluciones en

total. Para finalizar se debe retirar el material del tambor y se debe tamizar a través del tamiz No. 12 (1.70 mm) y así obtener el porcentaje de pérdida de la degradación del agregado. (ASTM International, 2014)

3.1.5 Durabilidad del agregado grueso a la acción de los sulfatos (ASTM C88/C88M – 18)

El ensayo de durabilidad frente a sulfatos, normado por la ASTM C88/C88M – 18, permite evaluar la solidez y resistencia química de los agregados gruesos expuestos a condiciones ambientales agresivas, como ciclos de humedad-sequedad o congelación-descongelación, los cuales pueden generar fracturas internas en las partículas y comprometer su desempeño estructural.

El procedimiento consiste en sumergir repetidamente las muestras de agregado en una solución saturada de sulfato durante un número determinado de ciclos. Esta exposición busca simular el ingreso de sales al interior de los poros del agregado. Luego de cada inmersión, la muestra se seca en un horno a 110 ± 5 °C, lo cual provoca la cristalización de las sales disueltas dentro de los poros del agregado.

Durante este proceso, el crecimiento de cristales genera presiones internas que pueden causar micro fisuras o rupturas en el material, especialmente en agregados con alta porosidad o baja calidad.

(ASTM International, 2014)

3.1.6 Tabla de resultados

Agregado grueso 3/4						
Norma	Parámetro	Valor	Unidad	Límites		Cumplimiento
				Mín.	Máx.	
ASTM C136	Granulometría	Ver Anexo 1				SI
ASTM C127	Gravedad específica Bulk (Ge)	2,598	g/cm^3	-	-	-
ASTM C127	Gravedad específica saturada con superficie seca (Ges)	2,632	g/cm^3	-	-	
ASTM C127	Gravedad específica aparente (Gea)	2,689	g/cm^3	-	-	-
ASTM C127	Porcentaje de absorción (%Abs)	1,352	g/cm^3	-	-	-
ASTMC131	Abrasión	25,925	%	-	40	SI
ASTM C88	Durabilidad a los sulfatos	1,978	%	-	18	SI

Tabla 3-1 Resultados del agregado grueso

Agregado medio 3/8						
Norma	Parámetro	Valor	Unidad	Límites		Cumplimiento
				Mín.	Máx.	
ASTM C136	Granulometría	Ver Anexo 2				SI
ASTM C127	Gravedad específica Bulk (Ge)	2,578	g/cm^3	-	-	-
ASTM C127	Gravedad específica saturada con superficie seca (Ges)	2,642	g/cm^3	-	-	-
ASTM C127	Gravedad específica aparente (Gea)	2,714	g/cm^3	-	-	-
ASTM C127	Porcentaje de absorción (%Abs)	1,302	g/cm^3	-	-	-
ASTM C88	Durabilidad a los sulfatos	3,423	%	-	18	SI

Tabla 3-2 Resultados del agregado medio

Agregado fino						
Norma	Parámetro	Valor	Unidad	Límites		Cumplimiento
				Mín.	Máx.	
ASTM C136	Granulometría	Ver Anexo 3				SI
ASTM C127	Gravedad específica Bulk (Ge)	2,452	g/cm^3	-	-	-
ASTM C127	Gravedad específica saturada con superficie seca (Ges)	2,598	g/cm^3	-	-	-
ASTM C127	Gravedad específica aparente (Gea)	2,673	g/cm^3	-	-	-
ASTM C127	Porcentaje de absorción (%Abs)	2,577	g/cm^3	-	-	-
ASTMC131	Equivalente de arena	68,241	%	50	-	SI
ASTM C88	Durabilidad a los sulfatos	8,777	%	-	18	SI

Tabla 3-3 Resultados del agregado fino

3.2 Ensayos del cemento asfáltico

Es fundamental considerar las principales propiedades del cemento asfáltico para el diseño de mezclas asfálticas, entre los cuales se encuentra la consistencia (viscosidad), pureza y seguridad. Estas propiedades influyen directamente en el comportamiento de la mezcla durante su producción, colocación y servicio.

Con el fin de verificar que el asfalto cumpla con las características requeridas, se aplican ensayos estandarizados, basados en normas internacionales como la ASTM, las cuales sirven como referencia técnica para la normativa nacional INEN.

A continuación, se describen los ensayos realizados para determinar las propiedades mecánicas y fisicoquímicas del cemento asfáltico, fundamentales para garantizar su desempeño en las condiciones climáticas y de carga esperadas.

3.2.1 Gravedad específica (ASTM D70 – 17)

La gravedad específica del cemento asfáltico es una propiedad fundamental que permite determinar la relación entre la masa de un volumen de asfalto y la masa de un volumen

igual de agua destilada, ambos medidos a una misma temperatura, usualmente de 25 °C (ASTM International, 2018a).

Este ensayo es esencial para convertir unidades de volumen en unidades de masa y se aplica tanto a bitúmenes sólidos, semisólidos como a emulsiones asfálticas. El procedimiento utiliza un picnómetro, el cual permite medir con precisión las masas involucradas en el ensayo. La gravedad específica se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{Gravedad específica} = \frac{(C - A)}{((B - A) - (D - C))}$$

Ecuación 3-10 Gravedad específica

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

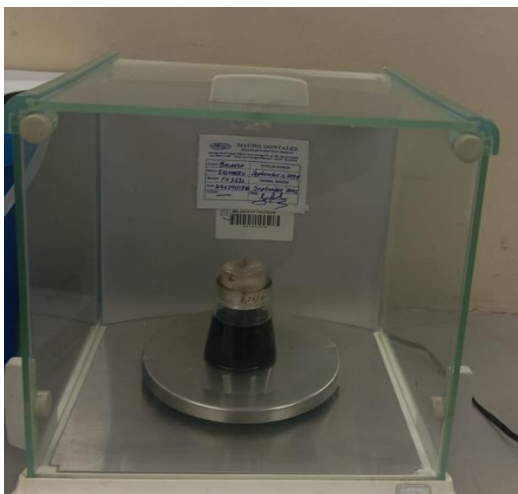


Ilustración 3-3 Picnómetro con tapón y asfalto

3.2.2 Viscosidad cinemática (ASTM D2170/D2170 M10)

La viscosidad cinemática es una propiedad fundamental que permite evaluar la fluidez y consistencia del cemento asfáltico bajo condiciones térmicas específicas. Este ensayo se realiza de acuerdo con la norma ASTM D2170/D2170M – 10, y consiste en medir el tiempo que tarda una cantidad determinada de asfalto en fluir, por efecto de la gravedad, a través de un tubo capilar calibrado conocido como viscosímetro de vidrio, bajo condiciones controladas de temperatura.

El ensayo se lleva a cabo utilizando un volumen estándar de 60 cm³ de muestra, y las temperaturas varían en función del tipo de asfalto:

- 60 °C para asfaltos líquidos (como los de penetración)
- 135 °C para asfaltos más viscosos o cementos asfálticos sólidos.

(ASTM International, 2018b).



Ilustración 3-4 Viscosímetro

3.2.3 Penetración (ASTM D5/D5M – 19a)

El ensayo de penetración es uno de los métodos más tradicionales y ampliamente utilizados para evaluar la consistencia o dureza del cemento asfáltico. La norma ASTM D5/D5M – 19a establece el procedimiento para determinar la profundidad que la aguja normalizada penetra en una muestra de asfalto bajo condiciones controladas.

El ensayo se realiza aplicando una carga de 100 gramos durante 5 segundos sobre una aguja de acero estandarizada, colocada perpendicularmente sobre la superficie del asfalto a una temperatura de 25 °C. La profundidad de penetración se mide en décimas de milímetro (0.1 mm) y se expresa como el promedio de al menos tres mediciones válidas, realizadas sobre la misma muestra.

El valor obtenido representa la consistencia del asfalto:

- Un valor alto de penetración indica un asfalto más blando.
- Un valor bajo de penetración indica un asfalto más duro o rígido.

El procedimiento incluye la fundición de la muestra en moldes de ensayo cilíndricos, luego enfriamiento a temperatura ambiente bajo condiciones controladas y por último ensayo en el penetrómetro y lectura directa de la penetración. (ASTM International, 1998b).



Ilustración 3-5 Picnómetro manual

3.2.4 Punto de ablandamiento (ASTM D36/D36M – 14)

Este ensayo permite determinar la temperatura a la cual un material bituminoso pierde su rigidez estructural y comienza a fluir, lo cual es fundamental para evaluar su comportamiento ante altas temperaturas. Este ensayo se rige por la norma ASTM D36/D36M – 14.

El procedimiento se realiza mediante el método del anillo y bola, donde se coloca una muestra de cemento asfáltico en un anillo metálico normalizado. Sobre la superficie de la muestra se coloca una esfera de acero de masa conocida, y todo el conjunto se sumerge

en un matraz con agua destilada, la temperatura se incrementa de forma controlada a una razón de 5 ± 0.5 °C por minuto.

La temperatura se mide en el momento en que la esfera desciende y alcanza una posición a una pulgada del fondo del matraz. Esta temperatura se registra como el punto de ablandamiento, el cual es indicativo de la resistencia del ligante asfáltico a la deformación térmica.

Un valor del punto de ablandamiento más alto implica mayor resistencia al ahuellamiento, especialmente en zonas cálidas y con tráfico pesado. El ensayo tiene su importancia debido a que indica la tendencia del material bituminoso a fluir o deformarse de manera inesperada bajo altas temperaturas, mostrando así los cambios de consistencia y deformaciones.

(ASTM International, 1998c).

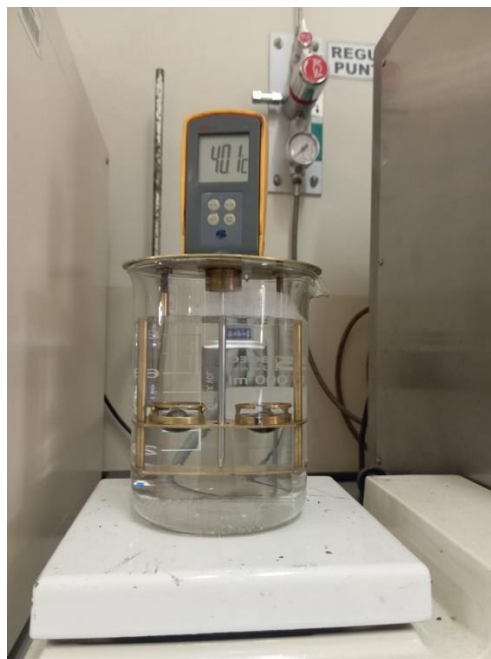


Ilustración 3-6 Ensayo anillo y bola

3.2.5 Ductilidad (ASTM D113 – 17)

Este ensayo permite determinar la capacidad del cemento asfáltico para deformarse plásticamente, es decir, antes de llegar a su punto de ruptura. Esta propiedad está directamente relacionada con la resistencia a la tracción y la cohesión del asfalto, es

importante para garantizar un buen comportamiento ante deformaciones en la estructura del pavimento.

De acuerdo con la norma ASTM D113 – 17, se debe moldear una muestra de asfalto en forma de briqueta y someterla a un alargamiento continuo a una velocidad de 5 cm por minuto dentro de un baño de agua mantenido a $25\text{ °C} \pm 0.5\text{ °C}$. Durante el ensayo, se registra la distancia total recorrida (en centímetros) por los extremos de la muestra desde el inicio del alargamiento hasta el momento en que se produce la rotura. En caso de no existir ruptura hasta los 100 cm se para el procedimiento y se registra el valor.

La distancia obtenida se interpreta como el valor de ductilidad, y se expresa en centímetros. Cuanto mayor sea este valor, mayor será la capacidad del asfalto de resistir esfuerzos de tracción sin fracturarse, lo cual es especialmente importante en zonas de climas fríos o donde se presentan movimientos estructurales en la vía. (ASTM International, 2020).

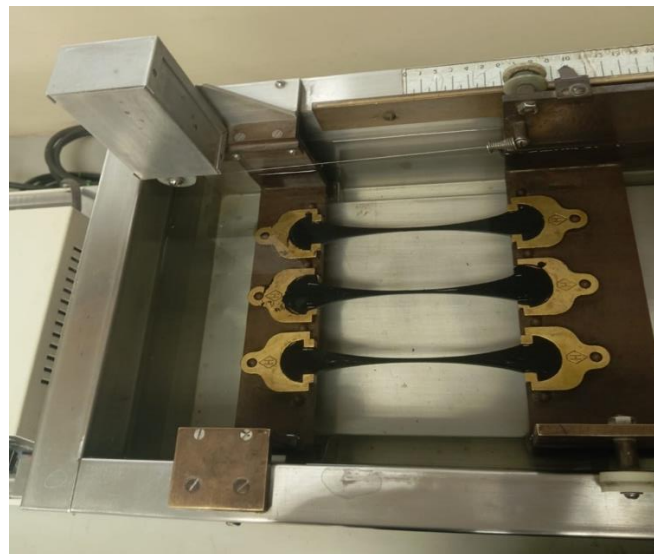


Ilustración 3-7 Ensayo de ductilidad

3.2.6 Tabla de resultados

A continuación, se muestra una tabla con los resultados obtenidos después de realizar todos los ensayos mencionados anteriormente:

Tabla de resultados Asfalto AC-20			
Ensayo	Valor	Unidades	Min
Gravedad Específica	1.008	-	-
Viscosidad Cinemática	370	Pa.s	300
Penetración	90	dmm	60
Punto de Ablandamiento	48	°C	-
Ductilidad	100	cm	50

Tabla 3-4 Tabla de resultados de los ensayos del Asfalto AC-20

CAPÍTULO IV

4. Diseño de mezclas asfálticas

4.1 Diseño de mezclas asfálticas según el método Marshall

El método Marshall es una técnica tradicional por lo cual es utilizada en laboratorios de pavimentos para el diseño de mezclas asfálticas en caliente, y fue desarrollado en la década de 1930 por el ingeniero Bruce Marshall del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. Este método fue concebido para evaluar mezclas asfálticas de grado denso y el objetivo principal es determinar el contenido óptimo de asfalto que proporcione la mejor combinación de resistencia, estabilidad y durabilidad para una cantidad específica de agregados.

Este método se limita para las mezclas en caliente que emplean un tamaño máximo de agregado de hasta 25 mm (1 pulgada), tiene un enfoque empírico ya que correlaciona resultados obtenidos en el laboratorio con el comportamiento esperado en campo.

La aplicación del método implica la preparación de muestras cilíndricas (briquetas) con dimensiones estándar las cuales son, 102 mm de diámetro y 63.5 mm de altura. Estas briquetas se elaboran manteniendo constante el tipo y la cantidad de agregados, pero se varía el contenido de asfalto. El proceso incluye lo siguiente:

- Calentamiento del cemento asfáltico y los agregados.
- Mezclado homogéneo de los materiales a temperatura de diseño.
- Compactación con un martillo estandarizado.
- Enfriamiento de las muestras.
- Ensayos mecánicos que determinan la estabilidad y flujo mediante unas graficas.

Las propiedades resultantes permiten seleccionar el contenido óptimo de asfalto que cumple con los límites establecidos por normas técnicas nacionales o internacionales, como el MOP 001-F 2002 o especificaciones de la AASHTO.

El método de diseño está regulado por una serie de ensayos de la ASTM, las normas de referencia son las siguientes:

- ASTM D6926: Preparación de Mezclas Bituminosas Utilizando Aparatos Marshall.
- ASTM D6927: Métodos de prueba estándar para estabilidad Marshall y flujo de mezclas bituminosas.
- ASTM D1559 o AASHTO T 245: Resistencia al Flujo Plástico de Mezclas Bituminosas, utilizando aparatos Marshall.

4.2 Propiedades volumétricas

Las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica son fundamentales para evaluar indirectamente su calidad y desempeño. Debido a que el comportamiento mecánico de la mezcla no puede determinarse únicamente por ensayos de resistencia, las características volumétricas permiten establecer una relación entre la cantidad de vacíos presentes y la durabilidad esperada del pavimento.

Según lo indicado por el Asphalt Institute (1982), las mezclas asfálticas óptimas deben presentar un contenido de vacíos del 3 al 5 %, ya que este rango permite asegurar una adecuada resistencia al daño por humedad, flexibilidad y resistencia a la deformación permanente. Para calcular el porcentaje de vacíos mencionado es necesario conocer las propiedades volumétricas de las 15 briquetas registrando parámetros como el diámetro, espesor, peso en el aire, peso sumergido en agua y peso saturado con superficie seca. A partir de estos datos se calcula la gravedad específica de cada briketa aplicando ecuaciones o correlaciones utilizando los parámetros previamente mencionados. (ASPHALT INSTITUTE, 1982).

Las ecuaciones que describen las propiedades volumétricas permiten establecer los parámetros para definir el rendimiento de la mezcla asfáltica y son las siguientes:

- **Gmb**: Gravedad específica Bulk de la briketa

$$Gmb = \frac{Wa}{Wb - Wc}$$

Ecuación 4-1 Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica

Donde:

Wa = Peso seco en aire

Wb = Peso saturado con superficie seca

Wc = Peso sumergido en agua a 25°C

- **Gsb**: Gravedad específica Bulk del agregado total

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

Ecuación 4-2 Gravedad específica Bulk del agregado total

Donde:

$P1_{(n)}$ = Porcentajes de la mezcla

$G1_{(n)}$ = Gravedad específica Bulk de cada material

- **Gsa**: Gravedad específica aparente del agregado total

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

Ecuación 4-3 Gravedad específica aparente del agregado total

Donde:

$P1_{(n)}$ = Porcentajes de la mezcla

$g1_{(n)}$ = Gravedad específica aparente de cada material

- **Gmt**: Gravedad específica máxima teórica

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

Ecuación 4-4 Gravedad específica máxima teórica

Donde:

Ps = Porcentaje de agregado en la mezcla

Gsb = Gravedad específica Bulk del agregado total

Pb = Porcentaje de asfalto en mezcla

$Gasf$ = Gravedad específica del asfalto

- **Gmm** : Gravedad específica máxima medida (Rice)

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

Ecuación 4-5 Gravedad específica máxima medida (Rice)

Donde:

A = Peso de la mezcla

B = Peso frasco, mezcla y agua

C = Peso frasco y agua

- **Gmt** : Gravedad específica efectiva del agregado

$$Gmt = \frac{100 - Pb}{\frac{100}{Gmm} - \frac{Pb}{Gasf}}$$

Ecuación 4-6 Gravedad específica efectiva del agregado

Donde:

Pb = Porcentaje de asfalto en la mezcla

$Gasf$ = Gravedad específica del asfalto

- **Pba** : Asfalto absorbido

$$Pba = 100 * \frac{Gse - Gsb}{Gse * Gsb} + Gasf$$

Ecuación 4-7 Asfalto Absorbido

Donde:

Gse = Gravedad específica efectiva del agregado

Gsb = Gravedad específica Bulk del agregado total

$Gasf$ = Gravedad específica del asfalto

- **Pbe** : Asfalto efectivo de la mezcla

$$Pbe = Pb * \frac{Pba}{100} * Ps$$

Ecuación 4-8 Asfalto efectivo de la mezcla

Donde:

Pb = Porcentaje de asfalto en la mezcla

Pba = Asfalto absorbido

Ps = Porcentaje de agregado en la mezcla

- f/a : relación Filler/Asfalto

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

Ecuación 4-9 Filler / Asfalto

Donde:

Pbe = Porcentaje de asfalto efectivo

- $\%Vv$: Porcentaje de vacíos con aire

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

Ecuación 4-10 Porcentaje de vacíos con aire

Donde:

Gb = Gravedad Bulk de la briqueta

Gmm = Gravedad específica máxima medida

- $Vagre$: Porcentaje de volumen de agregado vs volumen total

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

Ecuación 4-11 Porcentaje del volumen de agregado vs volumen total

Donde:

Ps = Porcentaje de agregado en la mezcla

Gb = Gravedad Bulk de la briqueta

Gsb = Gravedad específica Bulk del agregado total

- **Vam:** Porcentaje de vacíos del agregado mineral

$$Vam = 100 - Vagre$$

Ecuación 4-12 Porcentaje de vacíos del agregado mineral

Donde:

Vagre = Volumen del agregado vs volumen total

4.3 Estabilidad y flujo Marshall

La estabilidad y el flujo son dos parámetros fundamentales en el método Marshall para mezclas asfálticas, ya que permiten evaluar la capacidad de la mezcla para resistir deformaciones permanentes bajo cargas repetidas. La estabilidad representa la resistencia máxima a la carga que la mezcla puede soportar antes de fallar, mientras que el flujo indica la deformación plástica sufrida por la briqueta durante el ensayo.

Ambos parámetros se determinan luego de calcular la gravedad específica de cada briqueta y de someterlas al ensayo de carga axial, mediante el uso del aparato Marshall. Este procedimiento permite clasificar el comportamiento estructural de la mezcla en condiciones controladas.

La clasificación de la mezcla asfáltica se realiza con base en los límites establecidos por el Ministerio de Obras Públicas del Ecuador (MOP) en su norma MOP-001F-2002, específicamente en la tabla 405.5.4, la cual indica los límites mínimos y máximos permitidos en función del tipo de tránsito. A continuación, se presenta la tabla de referencia:

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	----				

Ilustración 4-1 Especificaciones para una mezcla asfáltica

Fuente: (MTO, 2002)

La estabilidad es un parámetro importante en el diseño de mezclas asfálticas, porque indica cual es la capacidad de la mezcla para resistir deformaciones cuando es sometido a cargas repetidas, que son las del tránsito vehicular. Entre mayor sea el valor, mayor será la capacidad del pavimento para soportar el tráfico sin fisurarse prematuramente.

Sin embargo, un valor excesivamente alto de estabilidad puede ser indicativo de una mezcla demasiado rígida, lo cual, aunque en apariencia puede parecer de mayor resistencia, este generará fragilidad y fisuración por fatiga en el pavimento. Por este motivo, el valor obtenido en el ensayo Marshall debe ser corregido mediante un factor de correlación que se encuentra en la Tabla 7.1 del Manual MS-2 del Asphalt Institute (2014). Esta corrección permite normalizar los resultados y compararlos adecuadamente con los criterios de aceptación establecidos para distintas condiciones de carga y tráfico.

La estabilidad corregida se obtiene multiplicando la estabilidad medida en el ensayo por el factor de corrección. Esta estabilidad ajustada se utiliza como criterio principal para seleccionar el contenido óptimo de asfalto, ya que debe alcanzarse un equilibrio entre resistencia (rigidez) y durabilidad (flexibilidad). (ASPHALT INSTITUTE, 2014).

Volume of Specimen, cm ³	Approximate Thickness of Specimen		Correlation Ratio
	mm _____	in. _____	
200 to 213	25.4	1	5.56
214 to 225	27.0	1 ¹ / ₁₆	5.00
226 to 237	28.6	1 ¹ / ₈	4.55
238 to 250	30.2	1 ³ / ₁₆	4.17
251 to 264	31.8	1 ¹ / ₄	3.85
265 to 276	33.3	1 ³ / ₈	3.57
277 to 289	34.9	1 ¹ / ₂	3.33
290 to 301	36.5	1 ⁵ / ₁₆	3.03
302 to 316	38.1	1 ³ / ₄	2.78
317 to 328	39.7	1 ⁷ / ₁₆	2.50
329 to 340	41.3	1 ¹ / ₂	2.27
341 to 353	42.9	1 ⁹ / ₁₆	2.08
354 to 367	44.4	1 ³ / ₄	1.92
368 to 379	46.0	1 ¹¹ / ₁₆	1.79
380 to 392	47.6	1 ⁵ / ₈	1.67
393 to 405	49.2	1 ³ / ₄	1.56
406 to 420	50.8	2	1.47
421 to 431	52.4	2 ¹ / ₁₆	1.39
432 to 443	54.0	2 ¹ / ₈	1.32
444 to 456	55.6	2 ³ / ₁₆	1.25
457 to 470	57.2	2 ¹ / ₄	1.19
471 to 482	58.7	2 ³ / ₈	1.14
483 to 495	60.3	2 ¹ / ₂	1.09
496 to 508	61.9	2 ⁵ / ₈	1.04
509 to 522	63.5	2 ³ / ₄	1.00
523 to 535	65.1	2 ⁷ / ₁₆	0.96
536 to 546	66.7	2 ¹ / ₂	0.93
547 to 559	68.3	2 ⁹ / ₁₆	0.89
560 to 573	69.8	2 ³ / ₄	0.86
574 to 585	71.4	2 ¹¹ / ₁₆	0.83
586 to 598	73.0	2 ⁵ / ₈	0.81
599 to 610	74.6	2 ³ / ₄	0.78
611 to 625	76.2	3	0.76

NOTES:
1. The measured stability of a specimen multiplied by the ratio for the thickness of the specimen equals the corrected stability for a 63.5-mm (2.5-in.) specimen.
2. Volume-thickness relationship is based on a specimen diameter of 101.6 mm (4 in.).

TABLE 7.1 Stability Correlation Ratios

Ilustración 4-2 Factores de corrección de estabilidad

Fuente: (Asphalt Institute, 2001)

El flujo Marshall representa la deformación vertical que experimenta una briqueta al ser sometida a una carga hasta alcanzar su punto de falla. Esta deformación se mide en centésimas de pulgada (1/100 in). El valor obtenido refleja la capacidad de deformación plástica de la mezcla antes de romperse.

Una mezcla asfáltica que presenta valores altos de flujo indica un comportamiento altamente plástico, es decir el material puede deformarse excesivamente bajo carga, comprometiendo la estabilidad estructural del pavimento. Por el contrario, valores bajos de flujo reflejan una mezcla frágil, por lo que puede agrietarse con facilidad. (ASPHALT INSTITUTE, 2014).

A continuación, se describe el procedimiento que se debe seguir para obtener los valores de estabilidad y flujo de las muestras:

- De cada briqueta determinar la altura y el diámetro.
- Se debe sumergir las briquetas Luego de 35 a 40 minutos antes de realizar el ensayo a una temperatura de $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$.



Ilustración 4-3 Briquetas sumergidas para ensayo Marshall

- Luego una por una primero secan las briquetas y después colocar en el dispositivo de prueba de grabación automática con el medidor de fluencia.
- Una vez que la briqueta se encuentre fijada se debe aplicar una carga de velocidad constante de deformación de 51 milímetros (2 pulgadas) por minuto hasta que la briqueta que se está ensayando falle, el valor máximo del punto de carga es registrado como estabilidad en libras.



Ilustración 4-4 Briqueta en la máquina de ensayo

- Mientras que para el flujo se espera a que la carga empiece a disminuir y se toma la lectura de la deformación de la briqueta, el valor del flujo se encuentra expresado en 1/100 pulgadas.

4.4 Cálculos de la mezcla asfáltica

4.4.1 Dosificación de la mezcla del agregado

Para obtener una mezcla asfáltica de calidad, se seleccionaron tres tipos de agregados pétreos que cumplen con los requisitos establecidos por la normativa vigente. Mediante el análisis granulométrico de cada uno de los agregados y aplicando las relaciones matemáticas establecidas en el MOP-001-F-2002, se determinaron las proporciones óptimas de cada agregado. Asegurando una adecuada distribución de partículas finas y gruesas. La dosificación fue utilizada para la elaboración de las 15 briquetas, empleadas en el procedimiento Marshall.

Tabla 405-5.1.

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

Ilustración 4-5 Tabla 405-5.1 Porcentajes de material que pasa por abertura de tamiz

Fuente: (MTOPI, 2002)

Para determinar las proporciones óptimas de cada tipo de agregado, se planteó una curva granulométrica combinada con los tres agregados, que cumpliera con los rangos especificados por el MOP-001-F-2002. En una franja se establece los límites superior e inferior. La mezcla resultante se ubicará idealmente en la zona central de la franja de

tolerancia. Esto garantiza una mezcla más equilibrada, contribuyendo a una mayor durabilidad y desempeño de la mezcla asfáltica.

Los porcentajes de cada agregado utilizados en la mezcla son los siguientes:

% DE MEZCLA AGREGADO	
A	25
B	25
C	50

A = Material Grueso
 B = Material Medio
 C = Material Fino

Tabla 4-1 Porcentajes de dosificación del agregado para la mezcla asfáltica propuesta

Considerando la dosificación del 25 % de agregado grueso, 25 % de agregado medio y 50 % de agregado fino, según lo detallado en la tabla 4-1, se procedió a calcular los pesos correspondientes de cada tipo de agregado para cada tamaño de partícula. Los valores fueron organizados en una tabla que incluye tanto el peso individual por fracción granulométrica como el peso acumulado total, con el fin de preparar las briquetas para el ensayo Marshall. A continuación, se presenta la tabla correspondiente:

MEZCLAS DE AGREGADOS

Tamiz#	1	3.4	1.2	3.8	4	8	30	50	100	200	p#200
Tzmm.	25,4	19	12,5	9,5	4,75	2,36	0,6	0,3	0,15	0,075	p0,075
mat. A	100,00	98,22	43,92	1,17	0,57	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	
mat. B	100,00	100,00	99,40	76,51	5,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
mat. C	100,00	100,00	100,00	100,00	94,90	69,00	34,00	21,00	12,00	7,50	
mezcla	100,00	99,56	85,83	69,42	48,95	34,63	17,00	10,50	6,00	3,75	
Ret.Ac.	0,00	0,44	14,17	30,58	51,05	65,38	83,00	89,50	94,00	96,25	3,75
Ret.Parc.	0,00	0,44	13,73	16,41	20,47	14,33	17,63	6,50	4,50	2,25	
peso	0,00	4,89	150,98	180,51	225,14	157,60	193,88	71,50	49,50	24,75	
p. acum.	0,00	4,89	155,87	336,38	561,52	719,13	913,00	984,50	1034,00	1058,75	1100,00
Espec mín	100	90	---	56	35	23	---	5	---	2	
Espec máx	100	100	---	80	65	49	---	19	---	8	

Tabla 4-2 Cantidad de peso por cada tamiz de la mezcla propuesta

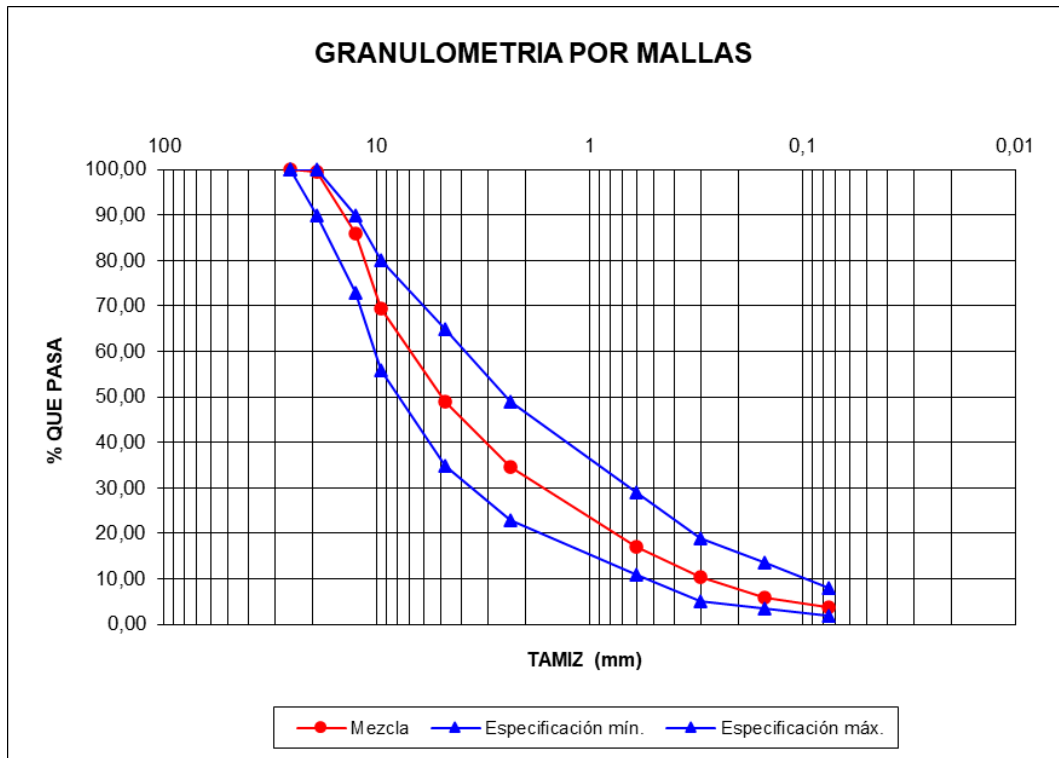


Ilustración 4-6 Curva granulométrica de la mezcla propuesta

4.4.2 Determinación del porcentaje teórico de asfalto

Durante la determinación de la dosificación de agregados para el diseño de la mezcla asfáltica, es importante establecer el contenido adecuado de ligante asfáltico que se añadirá a cada una de las briquetas de ensayo. Para evaluar el comportamiento de la mezcla frente a diferentes proporciones de asfalto, se deben elaborar tres briquetas por cada cinco contenidos crecientes de asfalto en incrementos de 0.5 %. La selección de estos contenidos debe incluir el valor teórico central, dos valores superiores y dos inferiores. De esta manera se identificará el punto óptimo de diseño mediante el análisis de curvas y parámetros volumétricos.

El contenido teórico de asfalto se determina aplicando una ecuación empírica propuesta por el Asphalt Institute, la cual ha sido adoptada y oficializada en Ecuador bajo el nombre de “fórmula maestra de obra”, según lo establecido en el MOP-001-F-2002. (MTO, 2002)

A continuación, la ecuación utilizada:

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

Ecuación 4-13 Porcentaje de asfalto teórico del Asphalt Institute

Donde:

P = Contenido teórico de asfalto para la mezcla

a = Porcentaje de material retenido en el tamiz #8

b = Porcentaje de material pasante del tamiz #8 y retenido en el tamiz #200

c = Porcentaje de material que pasa por el tamiz #200

k = Depende de:

- 0.15 para el 11 – 15 % del pasante del tamiz #200
- 0.18 para el 6 – 10 % del pasante del tamiz #200
- 0.20 para el 5 % o menor del pasante del tamiz #200

F = 0 – 2 % basado en la absorción del agregado fino o grueso, se sugiere 0.7 %

Parámetro F			
Nombre	% de Absorción	% de Mezcla	F
Agregado grueso	1,35	25	0,338
Agregado medio	1,30	25	0,325
Agregado fino	2,58	50	1,290
F total			1,95
F a usar			1

Tabla 4-3 Cálculo del parámetro F

Se utiliza el valor del factor $F = 1$, ya que lo sugerido es 0.7 % y al calcular dependiendo del porcentaje de absorción del material y el porcentaje de mezcla nos da un valor de 1.95.

Parámetro % teórico Asfalto	
a	65,38
b	30,88
k	0,2
c	3,75
F	1
P	5,43%

Tabla 4-4 Porcentaje teórico de Asfalto

Con el análisis de la tabla anterior, se determinó que el contenido teórico de asfalto calculado mediante la ecuación propuesta en el MOP-001-F-2002 es de 5.43 %. Para la ejecución de los ensayos en el laboratorio, este valor fue redondeado al inmediato superior, por lo que nos da un valor central de 5.5 %, este valor es de referencia para la

elaboración de las briquetas. Según lo establecido en el método Marshall, se seleccionarán dos porcentajes por debajo y dos por encima del valor central, con incrementos de 0.5 %, y así evaluar un rango representativo del comportamiento de la mezcla.

De esta forma, se prepararon quince briquetas, tres briquetas por cada uno de los siguientes contenidos de asfalto: 4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 % y 6.5 %. Esto permitirá posteriormente determinar el contenido óptimo de asfalto.

4.4.3 Elaboración de briquetas para el ensayo

Para llevar a cabo el diseño de la mezcla asfáltica mediante el método Marshall, fue necesario elaborar un total de 15 briquetas, correspondientes a tres réplicas por cada uno de los cinco contenidos de asfalto seleccionados anteriormente. Además, se elaboraron cinco briquetas adicionales para Rice, una por cada porcentaje de asfalto, destinadas a determinar la densidad teórica máxima de la mezcla asfáltica sin compactar.

Cada bache se define como la mezcla individual de agregados pétreos preparada para una biqueta, utilizando las proporciones establecidas en la dosificación granulométrica descrita en la tabla 4-2. La cantidad de material para cada bache se calculó en función del peso total de mezcla requerido para el ensayo.

En total, se prepararon:

- 15 baches de 1100 gramos cada uno, destinados a la compactación de las briquetas del ensayo Marshall.
- 5 baches de 2200 gramos cada uno, utilizados para el ensayo Rice.



Ilustración 4-7 Elaboración de baches

Una vez definidos los baches de mezcla, es necesario establecer los límites de temperatura adecuados para el mezclado y la compactación de la mezcla asfáltica. Estos rangos se determinan a partir de la carta de viscosidad, la cual representa gráficamente la relación entre la temperatura y la viscosidad del ligante asfáltico, permitiendo identificar las condiciones térmicas óptimas de trabajabilidad del material.

En este caso, se estableció que:

- La temperatura de mezcla se encuentra en el rango de 155 °C a 160 °C.
- La temperatura de compactación se encuentra entre 140 °C y 145 °C.

A cada bache se procede a incorporar el contenido de asfalto previamente calculado, asegurando una distribución homogénea del ligante en todo el agregado. Posteriormente, se vierte la mezcla en el rango de temperatura dentro del molde cilíndrico, y se realiza una compactación manual aplicando 15 golpes con una espátula, lo que permite una distribución inicial uniforme.

Luego, la mezcla es compactada utilizando la compactadora Marshall, aplicando 75 golpes por cada cara de la briqueta, conforme a lo establecido en la norma ASTM D6926. Este procedimiento busca garantizar la uniformidad de las briquetas y reproducir las condiciones de compactación similares a las que ocurren en campo.



Ilustración 4-8 Elaboración de mezcla asfáltica



Ilustración 4-9 Compactador Marshall



Ilustración 4-10 Briquetas compactadas para ensayarlas

# Briqueta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12	14	15
% Asfalto	4.5			5			5.5			6			6.5		

Tabla 4-5 Tabla de porcentaje de asfalto de cada briqueta

4.4.4 Cálculo de las propiedades volumétricas de las briquetas

Los pesos obtenidos de las briquetas constituyen el punto de partida para el cálculo de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Al representar gráficamente estas variables en función del porcentaje de asfalto, es posible observar las tendencias que permiten determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico para maximizar el desempeño de la mezcla asfáltica. Este valor corresponde al punto en el que se logra un equilibrio entre los criterios volumétricos, cumpliendo con los requisitos establecidos por el MOP-001-F-2002.

CAPÍTULO V

5. Análisis de resultados

5.1 Determinación del porcentaje óptimo de asfalto

Una vez realizado el ensayo Marshall y recopilados los resultados de las propiedades volumétricas de cada una de las briquetas correspondientes a los distintos contenidos de asfalto, se realizará la presentación y análisis de resultados. Con el fin de facilitar la interpretación en el presente trabajo de integración curricular, los datos serán organizados mediante tablas y gráficos, lo que permitirá identificar de manera precisa el contenido óptimo de asfalto para la mezcla evaluada.

Para determinar dicho valor, se elabora una gráfica en la cual se representan en el eje de las abscisas (X) los diferentes porcentajes de asfalto utilizados en la elaboración de las briquetas, mientras que en el eje de las ordenadas (Y) se coloca el porcentaje de vacíos en el aire (Vv).

De acuerdo con el Asphalt Institute, se traza una línea horizontal correspondiente al 4 % de vacíos en el aire (Vv). El punto de intersección entre esta línea y la curva de Vv obtenida define el porcentaje óptimo de asfalto. Para el presente trabajo, este análisis determinó que el contenido óptimo de asfalto es de 5,4 %, como se muestra en la gráfica correspondiente.

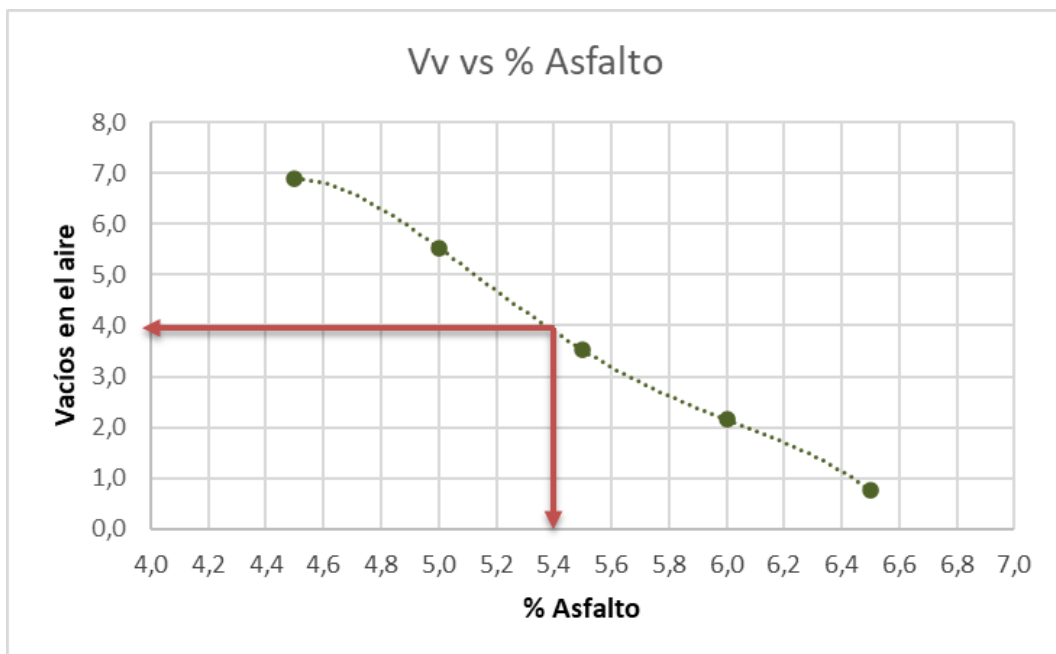


Ilustración 5-1 Gráfica Vv vs % de Asfalto

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

Una vez identificado el porcentaje óptimo de asfalto, es posible proceder con la determinación de las propiedades de la mezcla asfáltica. Para ello, se elaboran diferentes gráficas, en las cuales en el eje de las abscisas (X) representa los porcentajes de asfalto utilizados en el ensayo, y el eje de las ordenadas (Y) corresponde a cada una de las propiedades evaluadas: gravedad específica Bulk, estabilidad, flujo, vacíos en el agregado mineral (VAM) y la relación filler - asfalto (f/a).

A partir de estas representaciones gráficas, se traza una línea vertical sobre el valor del porcentaje óptimo de asfalto obtenido previamente (5,4 %), de forma que dicha línea intercepte cada una de las curvas generadas con los valores tabulados. El punto de intersección de la línea vertical con cada curva permite leer directamente el valor de la propiedad correspondiente para ese contenido específico de asfalto.

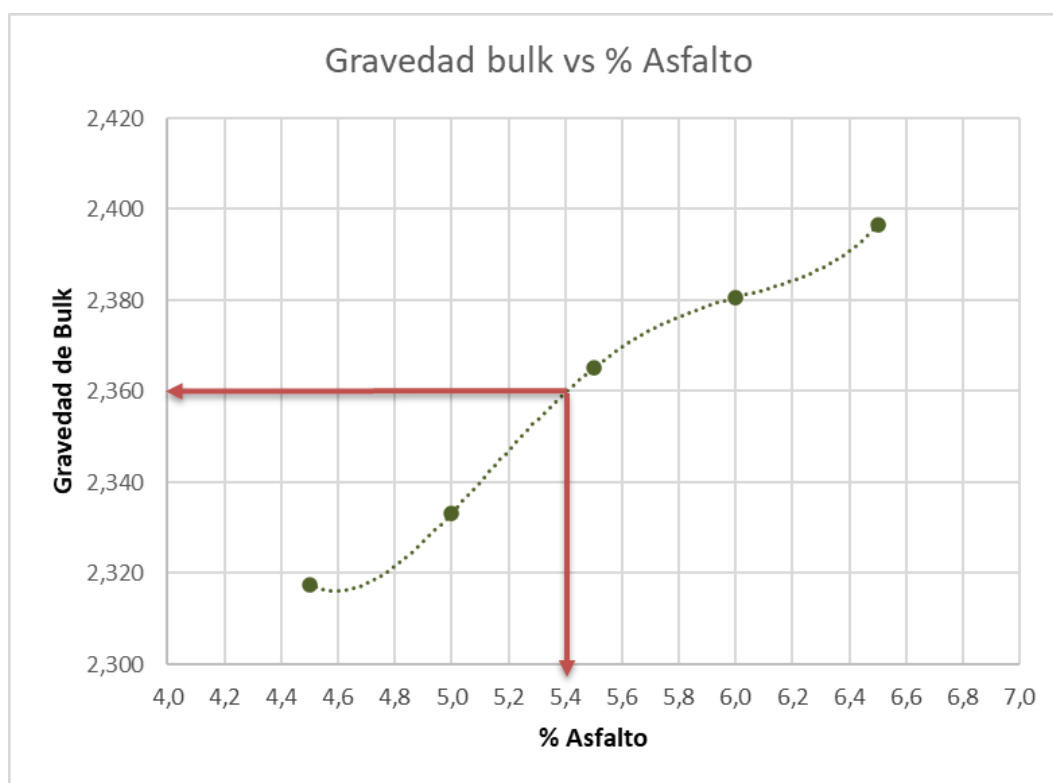


Ilustración 5-2 Gráfica de gravedad específica Bulk vs % de Asfalto

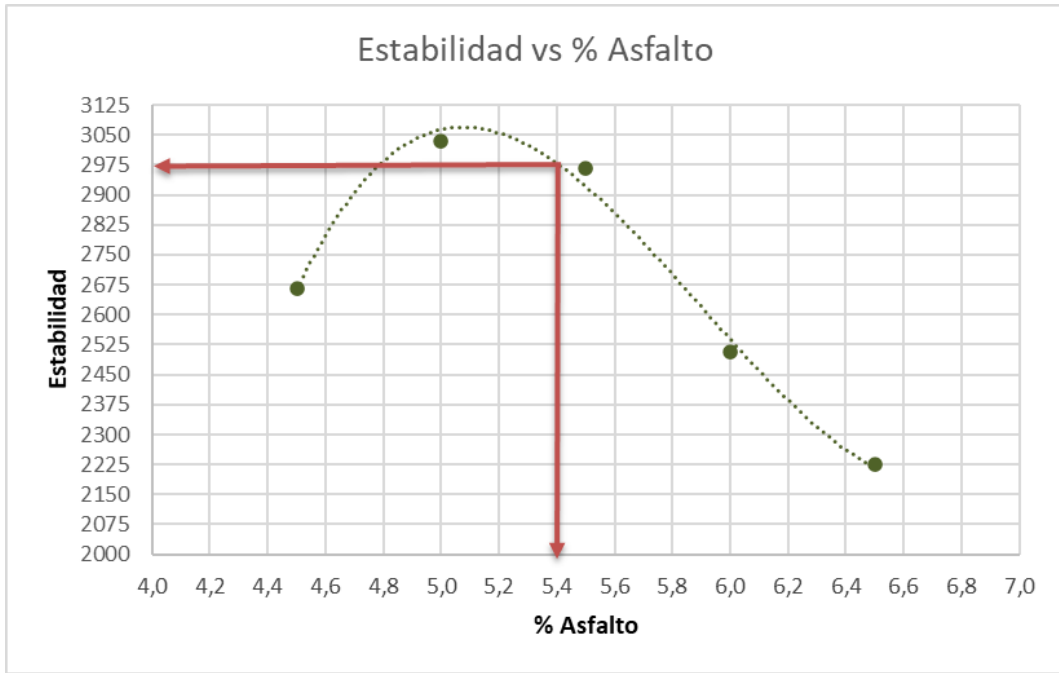


Ilustración 5-3 Gráfica de estabilidad vs % de Asfalto

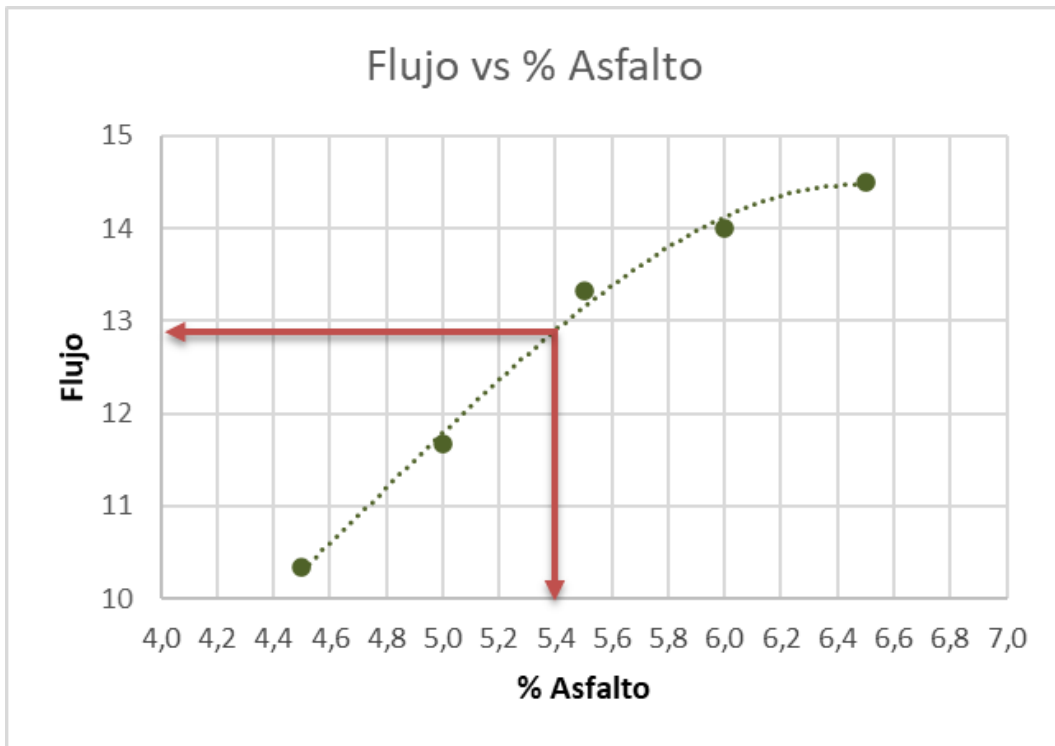


Ilustración 5-4 Gráfica de flujo vs % de Asfalto

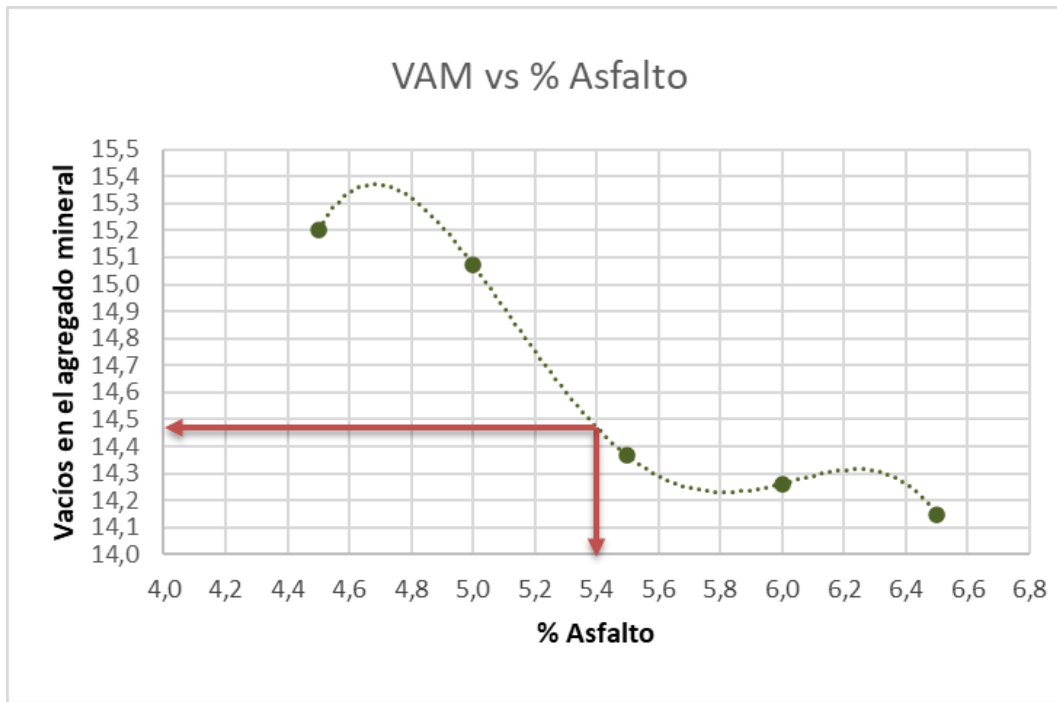


Ilustración 5-5 Gráfica de VAM vs % de Asfalto

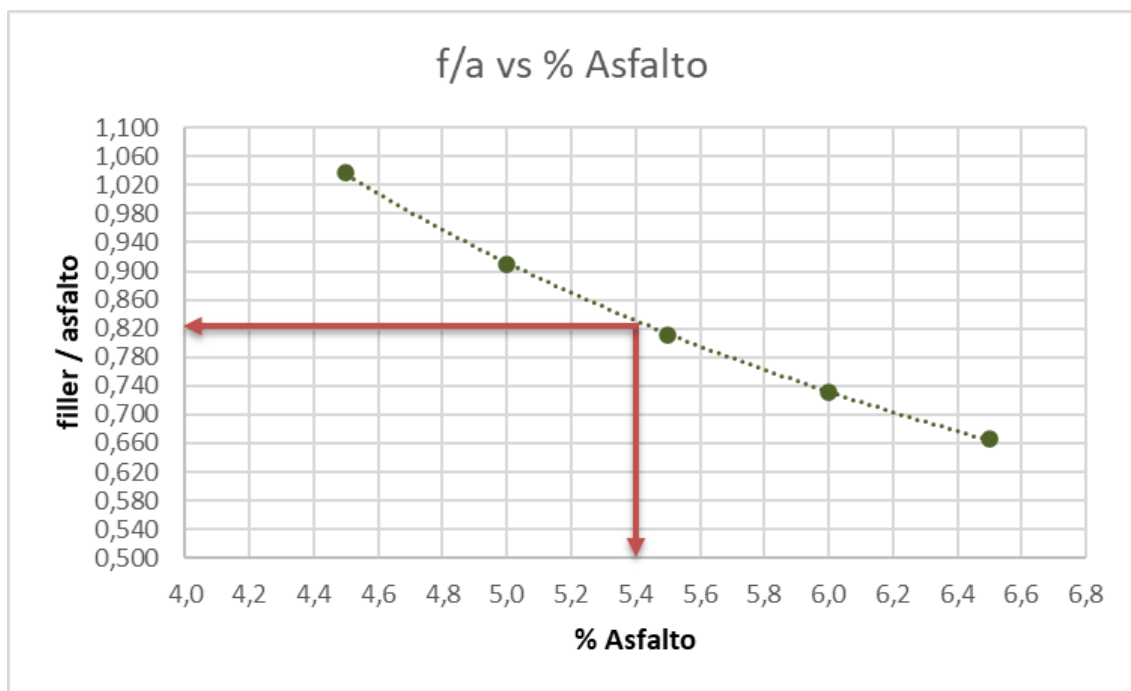


Ilustración 5-6 Gráfica f/a vs % de Asfalto

A continuación, se presenta una tabla resumen que compila los valores obtenidos para cada una de las propiedades de la mezcla asfáltica al porcentaje óptimo de asfalto (5,4 %), según lo determinado en las gráficas desarrolladas previamente.

Además, estos valores serán comparados con los límites máximos y mínimos establecidos en la norma MTOP-001-F-2002 para mezclas asfálticas destinadas a pavimentos con tráfico muy pesado, con el fin de verificar la conformidad técnica del diseño propuesto y su viabilidad.

Mezcla en caliente con 5.4% de contenido de asfalto			Especificaciones MTOP-001-F-2002		Verificación	
Ensayo	Valor determinado	Unidades	Min	Máx	Cumple	No cumple
Gravedad Bulk	2.360	g/cm ³	-	-	-	
Estabilidad	2975	lb	2200	-	sí	
Flujo	12,8	pulg /100	8	14	sí	
VAM	14,48	%	13	-	sí	
f/a	0,820	-	0,8	1,2	sí	

Tabla 5-1 Tabla resumen de verificación de datos con especificaciones del MTOP de tráfico muy pesado

CAPÍTULO VI

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

- Como se indica en la tabla resumen de las propiedades mecánicas del agregado con los parámetros establecidos por el MOP-001F-2002 se demuestra que los materiales pétreos tanto fino, medio y grueso recolectados de la mina Caizan Chico 2 cumplen con los límites especificados por ende el material es apto para ser usado en el diseño de mezclas asfálticas.
- Según la tabla resumen de las propiedades mecánicas del asfalto comparadas con requisitos establecidos por el MOP-001F-2002, se concluye que el asfalto AC-20 proveniente de la planta asfáltica Naranjo López cumple con las especificaciones necesarias para ser utilizada como ligante en el diseño de la mezcla asfáltica.
- Después de analizar el resultado obtenido en el gráfico filler/asfalto se concluye que el porcentaje de material fino utilizado en la mezcla asfáltica se encuentra en el límite de los requerimientos establecidos en el MOP-001F-2002 ya que el valor de la relación filler/asfalto es 0.820 y el límite mínimo de la norma es 0.8.
- Al observar la tabla 5-1 en la cual se muestran los resultados obtenidos a partir de las gráficas comparadas con los parámetros máximos y mínimos requeridos según el MTOP-001F-2002 los valores tanto de gravedad específica Bulk, estabilidad, flujo, vacíos en el agregado mineral y la relación filler/asfalto están dentro de los

rangos establecidos, por lo que se concluye que la mezcla asfáltica óptima es la adecuada para un tráfico de carga pesada que se analizó en el presente trabajo.

- Se realizó el cálculo del porcentaje de asfalto teórico que se debería poner a la mezcla asfáltica que va a ir sobre el agregado para la elaboración de las briquetas y dio como resultado 5.43% del cual, se aproximó a 5.5% y se consideró los valores inmediatos superiores e inferiores con el objetivo de determinar el porcentaje óptimo para la mezcla que en este caso se obtuvo un valor de 5.4% que varía con solo 0.03% del porcentaje teórico calculado.
- Después del análisis de resultados, se concluye que la mezcla asfáltica compuesta por 25% de agregado grueso, 25% de agregado medio, 50% de agregado fino y 5,4% del asfalto óptimo obtenidos después de ensayar las briquetas cumple con todas las especificaciones de MOP-001F-2002 por lo tanto la mezcla es eficiente para poder ser utilizada.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda que al momento de realizar la granulometría se coloque un porcentaje de material superior al que se va a utilizar ya que es muy común que exista desperdicio al momento de trasladar el material de un lugar a otro en especial del agregado fino.
- Es recomendable usar material de textura angular en lugar de lisa porque esto favorece a la adherencia entre el agregado y el asfalto lo que da mayor estabilidad y durabilidad a la mezcla asfáltica.
- Para otros ensayos realizados con el material de la mina Caizan Chico 2 se recomienda no disminuir el porcentaje de material fino en la dosificación para la elaboración de baches ya que este afectará la relación filler/asfalto ya que este depende del porcentaje de material pasante del tamiz #200.
- Se recomienda que durante el ensayo Marshall se controle los rangos de temperatura ya que el pavimento está en su condición más desfavorable. Además se recomienda tener cuidado al transportar de las hornillas a los moldes todo el material para que no haya una pérdida de material significativa y esto afecte los resultados de estabilidad y flujo.

Bibliografia

- ASPHALT INSTITUTE. (1982). *Ms* 22.
<https://www.scribd.com/document/748879270/ms-22>
- ASPHALT INSTITUTE. (2007). *The Asphalt Handbook*.
- ASPHALT INSTITUTE. (2014). *MS-2 Asphalt Mix Design Methods* (Vol. 7).
- ASTM International. (s. f.). *Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2419-14>
- ASTM International. (1998a). RESISTANCE to DEGRADATION of SMALL-SIZE COARSE AGGREGATE by ABRASION and IMPACT in the LOS ANGELES MACHINE. En *Asphalt Materials and Mix Design Manual* (pp. 17-18). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1425-1.50009-4>
- ASTM International. (1998b). Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. En *Manual on Hydrocarbon Analysis, 6th Edition* (pp. 47-47-3).
ASTM International. <https://doi.org/10.1520/MNL10829M>
- ASTM International. (1998c). Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). En *Manual on Hydrocarbon Analysis, 6th Edition* (pp. 50-50-54). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/MNL10830M>
- ASTM International. (2014). *Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*. ASTM International.
https://doi.org/10.1520/C0088_C0088M-18
- ASTM International. (2018a). *Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method)*.
- ASTM International. (2018b). *Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens) D2170/D2170M – 10*.

ASTM International. (2019a). *ASTM C136—Norma ASTM C136*.

<https://www.studocu.com/ec/document/universidad-tecnica-del-norte/fundamento-de-ciencia-de-los-materiales/astm-c136-norma-astm-c136/78873334>

ASTM International. (2019b, enero 26). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*.

<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/90571/ce883b9768bd463a99ef0ff45e620ef5/ASTM-C127-15.pdf>

ASTM International. (2019c, enero 29). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*.

<https://www.scribd.com/document/570830490/ASTM-C128-15>

ASTM International. (2020). *Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials*.

MTOP 2002. (s. f.). Recuperado 25 de junio de 2025, de https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/MPR_Chimborazo_Cumanda_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002.pdf

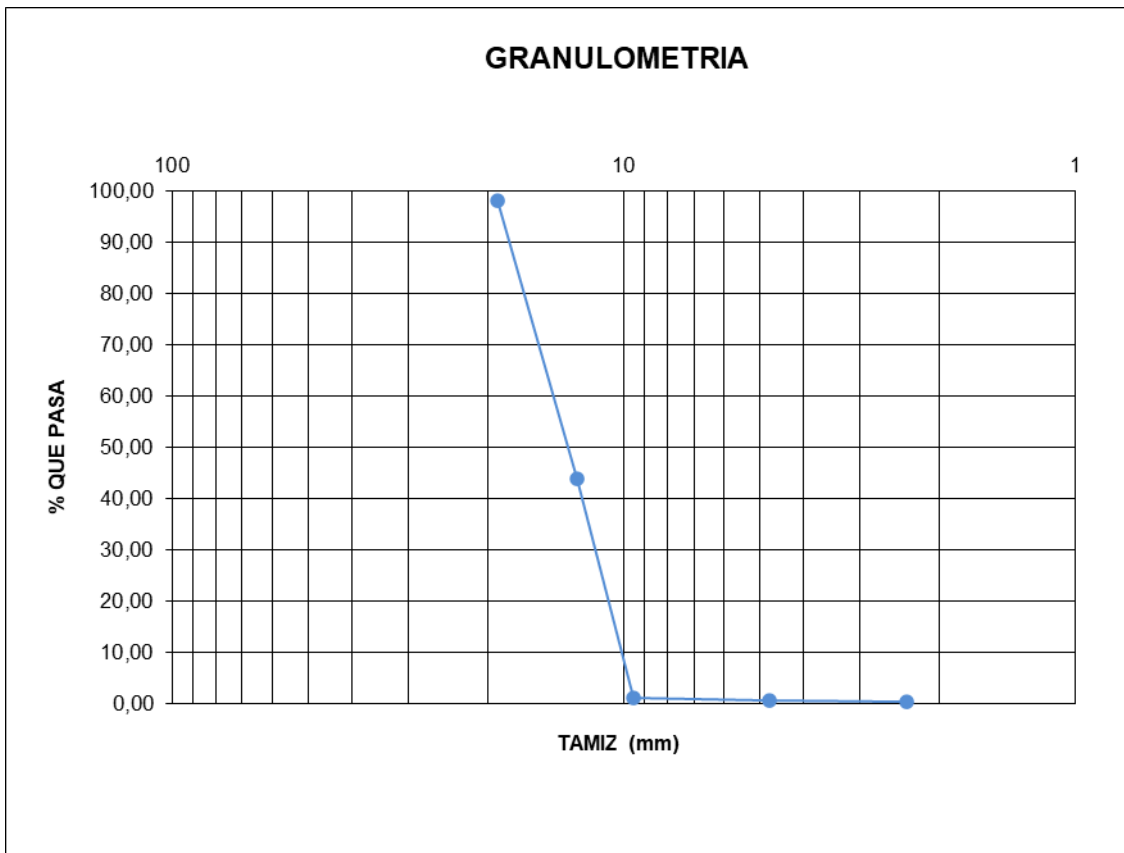
REGLAMENTO TÉCNICO ECUATORIANO RTE INEN 237 “CEMENTOS ASFÁLTICOS”, RESOLUCIÓN No. 15 149, 2015-035 (2015).

<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/reglamentos/RTE-237.pdf>

Anexos

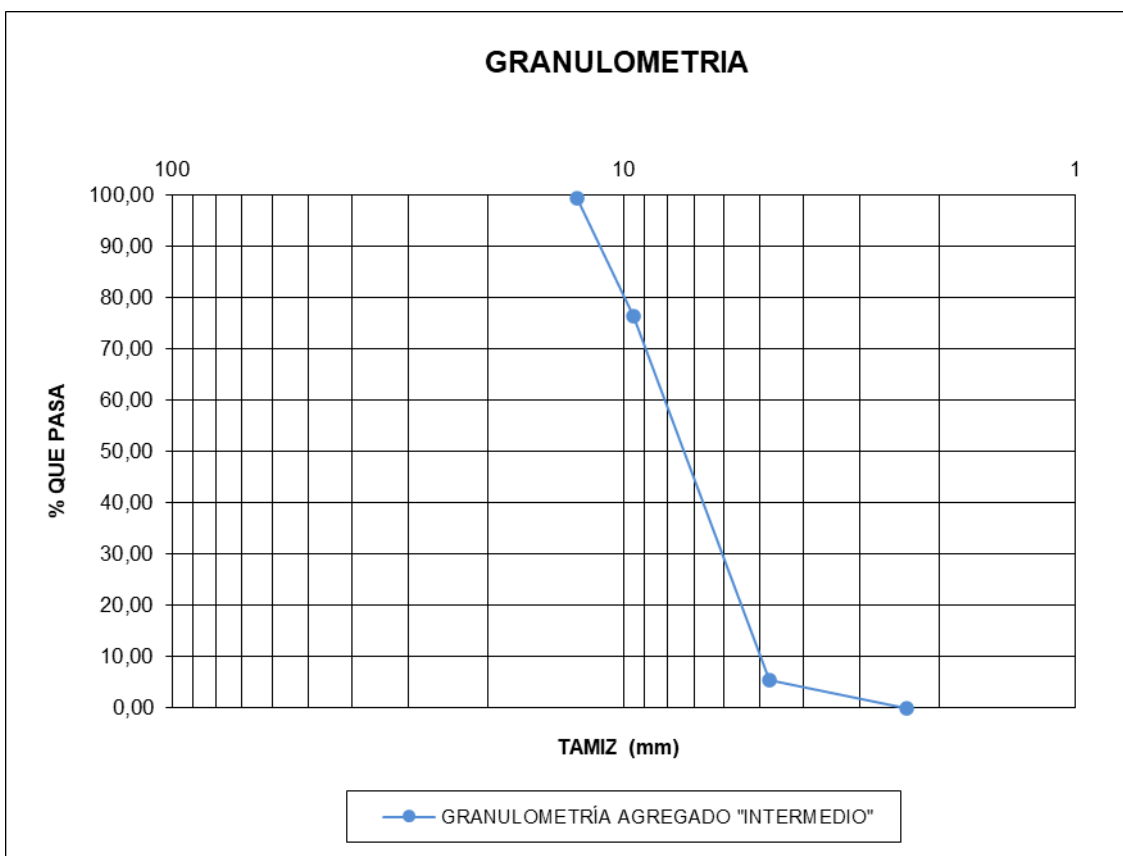
Anexo 1: Curva granulométrica del agregado grueso

GRANULOMETRÍA AGREGADO "GRUESO"				
No. Tamiz	Peso parcial (gr)	Peso parcial acumulado (gr)	% Retenido	% Pasante
No. 3/4	17,8	17,8	1,78	98,22
No. 1/2	543	560,8	56,08	43,92
No. 3/8	427,5	988,3	98,83	1,17
No. 4	6	994,3	99,43	0,57
No. 8	0,7	995	99,50	0,50
Pasa No. 8	5	1000	100,00	0,00
Total	1000			



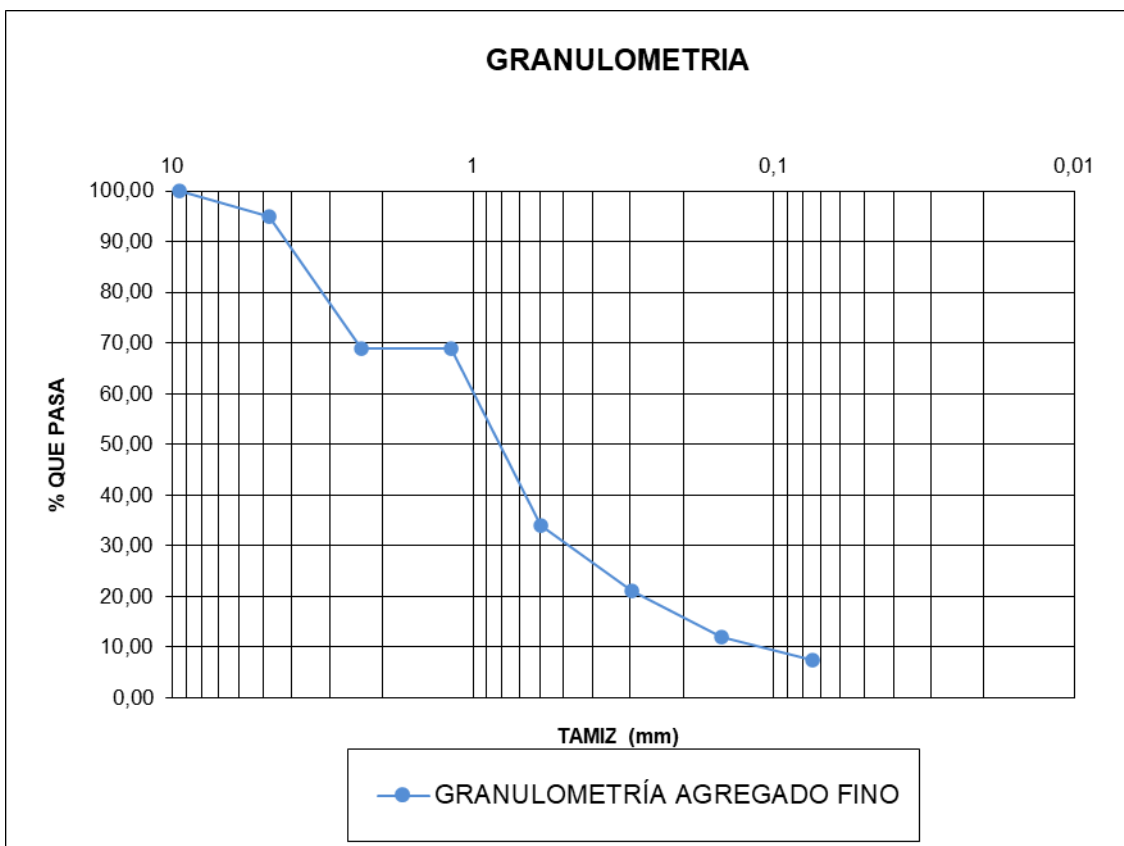
Anexo 2: Curva granulométrica del agregado medio

GRANULOMETRÍA AGREGADO "INTERMEDIO"				
No. Tamiz	Peso parcial (gr)	Peso parcial acumulado (gr)	% Retenido	% Pasante
No. 1/2	6	6	0,60	99,40
No. 3/8	228,9	234,9	23,49	76,51
No. 4	710,7	945,6	94,56	5,44
No. 8	54,4	1000	100,00	0,00
Pasa no.8	0	1000	100,00	0,00
Total	1000			



Anexo 3: Curva granulométrica del agregado fino

GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO				
No. Tamiz	Peso parcial (gr)	Peso parcial acumulado (gr)	% Retenido	% Pasante
No. 3/8	0	0	0,00	100,00
No. 4	51	51	5,10	94,90
No. 8	259	310	31,00	69,00
No. 16	0	310	31,00	69,00
No. 30	350	660	66,00	34,00
No. 50	130	790	79,00	21,00
No. 100	90	880	88,00	12,00
No. 200	45	925	92,50	7,50
Pan	75	1000	100,00	0,00
Total	1000			



Anexo 7: Tabla de cálculos de las propiedades volumétricas de cada briqueta con su respectivo porcentaje de asfalto.

Briqueta No	% Asfalto	Espesor especimen (mm)	Diámetro especimen (mm)	Peso (gr)			Gmb (Gs Bulk) g/cm3	Vol (cm3)	Estabilidad (lb)	Flujo (1/100 in)	Estabilidad promedio (lb)	Flujo promedio (1/100 in)
				Peso en el aire	Peso en el agua	Peso saturado seco (SSS)						
1	4,5	62,65	101,32	1133,88	652,58	1138,94	2,331	486,36	2900	11,5	2667	10
2		64,53	101,86	1138,36	652,56	1147,01	2,302	494,45	2850	9		
3		52,60	101,66	1128,96	646,97	1133,84	2,319	486,87	2250	10,5		
4	5,0	51,97	101,46	1135,23	650,28	1137,11	2,332	486,83	3000	10,5	3033	12
5		62,28	101,94	1133,49	651,68	1137,10	2,335	485,42	2750	10,5		
6		62,01	101,68	1139,79	653,12	1141,70	2,333	488,58	3350	14,0		
7	5,5	61,49	101,68	1149,51	667,99	1150,02	2,385	482,03	3000	13,0	2967	13
8		61,22	101,62	1143,49	664,33	1144,51	2,381	480,18	2800	14,0		
9		59,30	101,72	1139,52	652,40	1141,61	2,329	489,21	3100	13,0		
10	6,0	61,54	101,85	1155,97	668,88	1157,11	2,368	488,23	2275	15,0	2508	14
11		60,70	101,76	1147,88	666,31	1148,59	2,380	482,28	2650	13,0		
12		60,07	101,83	1149,16	669,46	1149,48	2,394	480,02	2600	14,0		
13	6,5	61,58	101,92	1158,82	676,25	1159,60	2,397	483,35	2150	13,0	2225	15
14		61,61	102,22	1157,25	675,56	1157,79	2,400	482,23	2225	17,0		
15		61,52	101,65	1156,27	674,13	1157,46	2,392	483,33	2300	13,5		

Briqueta No	% Asfalto	Gmb (Gs Bulk) g/cm3	Gmb promedio	Gmm (Gs máx medido) g/cm3	Gse (Gs efectivo agregado) g/cm3	Asfalto absorbido Pba	% Asfeto efectivo mezcla Pbe	Relación filler/asf alto	%Vol agregado	% Vacíos en el aire Vv	Vv promedio	% Vacíos agregado mineral VAM
1	4,5	2,331	2,317	2,489	2,674	0,928	3,614	1,038	84,797	6,34	6,9	15,2
2		2,302								7,51		
3		2,319								6,84		
4	5,0	2,332	2,333	2,470	2,674	0,928	4,119	0,911	84,928	5,60	5,5	15,1
5		2,335								5,47		
6		2,333								5,56		
7	5,5	2,385	2,365	2,451	2,674	0,928	4,623	0,811	85,634	2,72	3,5	14,4
10		2,381								2,86		
11		2,329								4,98		
8	6,0	2,368	2,381	2,433	2,674	0,928	5,128	0,731	85,738	2,68	2,2	14,3
9		2,380								2,17		
12		2,394								1,60		
13	6,5	2,397	2,397	2,415	2,674	0,928	5,633	0,666	85,852	0,72	0,8	14,1
14		2,400								0,62		
15		2,392								0,93		