

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE HÁBITAT, INFRAESTRUCTURA Y CREATIVIDAD

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



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

**TEMA: DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR EL
MÉTODO MARSHALL CON MATERIAL DE LA MINA “CARLOS ALBERTO” UBICADA
EN LA PARROQUIA DE GUAYLLABAMBA CON ASFALTO AC-20.**

AUTOR: XAVIER EDMUNDO JÁCOME CÁRDENAS

DIRECTOR: ING. GUSTAVO YÁNEZ

QUITO – ECUADOR

2025

Dedicatoria

Agradecimiento

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue determinar la cantidad óptima de cemento asfáltico mediante el método Marshall para una mezcla con asfalto AC-20. Para esto, se realizaron los análisis necesarios a los agregados minerales procedentes de la Mina Carlos Alberto, ubicada en la Parroquia Guayllabamba, Provincia de Pichincha. Los resultados indicaron que el porcentaje óptimo de asfalto es de 6.33%, logrando una estabilidad y flujo dentro de los rangos admisibles. Sin embargo, se identificó que la relación filler/betún no se encuentra dentro de los límites, lo que influyó en cantidad de aire presente en la mezcla. A modo de conclusión, la mezcla es apropiada para un diseño de tráfico pesado, pese a la limitación mencionada.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación	1
1.2. Planteamiento del problema.....	1
1.3. Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4. Alcance.....	3
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	3
2.1. Definiciones	3
2.1.1 Asfalto	3
2.1.2 Betún	3
2.1.3 Petróleo	4
2.2. Ligantes asfálticos usados en pavimentos.....	4
2.2.1 Cemento Asfáltico.....	5
2.2.1.1. Clasificación del cemento asfáltico por el grado de viscosidad	5
2.2.1.2. Clasificación del cemento asfáltico por el grado de penetración.....	6
2.2.1.3. Propiedades del cemento asfáltico	7
2.3. Materiales Pétreos.....	9
2.3.1 Definición	9
2.3.2 Agregados pétreos.....	9
2.3.3 Clasificación de los agregados minerales	10
2.3.4 Propiedades de los agregados pétreos.....	12

2.4. Mezclas Asfálticas	14
2.4.1 Clasificación de mezclas asfálticas	14
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE ENSAYO Y DISEÑO	16
3.1. Diseño de la mezcla asfáltica.....	16
3.1.1 Granulometría	16
3.1.2 Porcentaje Teórico de Cemento Asfáltico	18
3.1.3 Ensayo de Abrasión.....	19
3.1.4 Gravedad Específica del Agregado Mineral	22
3.1.4.1. Gravedad Específica del Agregado Grueso	23
3.1.4.2. Gravedad Específica del Agregado Fino.....	25
3.1.5 Equivalente de Arena	27
3.1.6 Ductilidad del Cemento Asfáltico.....	29
3.1.7 Gravedad Específica del Cemento Asfáltico.....	30
3.1.8 Viscosidad Rotatoria	31
3.1.9 Penetración.....	31
3.2. Ensayo Marshall.....	31
3.2.1 Gravedad Específica Bulk de la briqueta.....	32
3.2.2 Gravedad Específica Bulk del agregado combinado	32
3.2.3 Estabilidad y Flujo	33
3.3. Ensayos Complementarios y Análisis Volumétrico	34
3.3.1 Gravedad Específica Máxima Teórica (RICE – Gmm)	35
3.3.2 Gravedad Específica Efectiva Medida.....	35
3.3.3 Parámetros Volumétricos de Diseño	36

3.3.4 Relación Filler – Asfalto	37
CAPÍTULO 4: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO	39
4.1. Procedencia de las Muestras	39
4.2. Granulometría	40
4.3. Porcentaje Teórico de Cemento Asfáltico en la mezcla	41
4.4. Ensayos de Agregados Minerales	42
4.5. Ensayos de Cemento Asfáltico.....	42
4.6. Elaboración de Briquetas para el ensayo Marshall	43
4.7. Ensayo Marshall.....	46
4.8. Ensayo RICE.....	47
4.9. Porcentaje Óptimo de Asfalto	49
CAPÍTULO 5: DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA ÓPTIMA	51
5.1. Presentación de Resultados.....	51
5.2. Análisis de los Resultados Obtenidos	56
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57
REFERENCIAS.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Tamizadora para agregados gruesos	18
Figura 3.2: Máquina de los Ángeles	20
Figura 3.3: Masa de la muestra seca	26
Figura 3.4: Probeta usada en el ensayo.....	28
Figura 3.5: Prensa Marshall	34
Figura 4.1: Ubicación Mina Carlos Alberto.....	39
Figura 4.2: Granulometría para el diseño	41
Figura 4.3: Cálculo del Porcentaje de Asfalto	41
Figura 4.4: Elaboración de las muestras a ensayar	43
Figura 4.5: Mezcla de los agregados y cemento asfáltico	44
Figura 4.6: Compactador Marshall	45
Figura 4.7: Briquetas iniciales	45
Figura 4.8: Total de briquetas a ensayar	46
Figura 4.9: Curva Va vs Asfalto.....	50
Figura 4.10: Curva Estabilidad vs Asfalto	50
Figura 4.11: Curva Gs Bulk vs Asfalto.....	51
Figura 5.1: Gs Bulk vs Asfalto óptimo	52
Figura 5.2: Flujo vs Asfalto óptimo	53
Figura 5.3: Estabilidad vs Asfalto óptimo.....	53
Figura 5.4: Vacíos de aire vs Asfalto óptimo	54
Figura 5.5: Filler-Betún vs Asfalto óptimo	54

Figura 5.6: VAM vs Asfalto óptimo.....	55
Figura 5.7: VAF vs Asfalto	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de la malla	17
Tabla 3.2: Masa de los tamaños indicados (g). Gradación	20
Tabla 3.3: Masa de carga requerida	21
Tabla 3.4: Requerimientos para agregados gruesos	22
Tabla 3.5: Masa mínima de ensayo.....	23
Tabla 3.6: Requerimientos para Estabilidad y Flujo	34
Tabla 4.1: Granulometría del agregado mineral.....	40
Tabla 4.2: Porcentaje de mezcla del agregado	40
Tabla 4.3: Resultados de los ensayos de Agregados Minerales	42
Tabla 4.4: Resultados de los ensayos de cemento asfáltico	43
Tabla 4.5: Resultados del ensayo Marshall.....	47
Tabla 4.6: Gravedad Específica Máxima de la mezcla	48
Tabla 4.7: Gravedad Específica Máxima Teórica	48
Tabla 4.8: Resultados del ensayo RICE	49
Tabla 4.9: Valor óptimo de asfalto	51
Tabla 5.1: Especificaciones para la mezcla asfáltica en caliente con 6.33% de cemento asfáltico.....	56

ÍNDICE DE ECUACIONES

(Ecuacion 3.1).....	19
(Ecuacion 3.2).....	19
(Ecuacion 3.3).....	21
(Ecuacion 3.4).....	22
(Ecuacion 3.5).....	24
(Ecuacion 3.6).....	24
(Ecuacion 3.7).....	25
(Ecuacion 3.8).....	25
(Ecuacion 3.9).....	26
(Ecuacion 3.10).....	27
(Ecuacion 3.11).....	27
(Ecuacion 3.12).....	27
(Ecuacion 3.13).....	29
(Ecuacion 3.14).....	30
(Ecuacion 3.15).....	32
(Ecuacion 3.16).....	33
(Ecuacion 3.17).....	35
(Ecuacion 3.18).....	35
(Ecuacion 3.19).....	36
(Ecuacion 3.20).....	36
(Ecuacion 3.21).....	37
(Ecuacion 3.22).....	37

(Ecuacion 3.23).....	38
(Ecuacion 3.24).....	38

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

La infraestructura vial constituye parte importante del desarrollo de una comunidad ya que sirve de conexión entre varios puntos, además de permitir el acceso a distintos servicios y facilitar el transporte de bienes.

De este modo, la importancia de este trabajo se centra en un diseño apropiado de mezclas asfálticas para pavimentos flexibles. Para ello, es necesario cumplir con los requisitos y normativas correspondientes, como la MOP-001-F de 2002, que establece parámetros técnicos fundamentales como la estabilidad y el flujo, esenciales para garantizar el correcto desempeño de la capa de rodadura.

En este contexto, se plantea evaluar la calidad de los materiales provenientes de la mina “Concesión Minera Carlos Alberto”, mediante la ejecución de diferentes ensayos que permitan verificar su comportamiento y obtener un diseño eficiente, funcional y seguro para los distintos usuarios de la vía. Para lo cual, se usará de referencia la normativa vigente AASHTO, con el fin de establecer parámetros de control y conocer los límites establecidos para que las propiedades de los materiales tengan el comportamiento deseado.

1.2. Planteamiento del problema

Una de las principales razones por las cuales el pavimento flexible presenta deterioros tempranos se debe a la participación de los agregados que lo conforman, parámetro que debe ser evaluado y corregido en el diseño, ya sea debido a la inadecuada proporción de los materiales o

la deficiente calidad de los mismos. Un diseño inadecuado puede presentar varios problemas a lo largo de su ejecución o tiempo de vida útil tales como un aumento de riesgo en la integridad de los usuarios, así como también un mayor costo al momento de realizar la reparación efectiva.

Por lo tanto, se debe garantizar el cumplimiento mínimo de los requisitos establecidos en la normativa MOP-001-F 2002, logrando así un comportamiento óptimo de la capa de rodadura junto con la evaluación respectiva de los componentes a utilizar.

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar y evaluar una mezcla asfáltica por el método Marshall con material proveniente de la mina Carlos Alberto con asfalto AC-20.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar la cantidad adecuada de material para obtener una mezcla asfáltica adecuada.
- Verificar el cumplimiento de los requisitos establecidos en la normativa correspondiente.
- Realizar el análisis correspondiente de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio.

1.4. Alcance

El presente trabajo tiene como alcance la realización de una serie de ensayos de laboratorio para el diseño apropiado de una mezcla asfáltica mediante el método Marshall, con el fin de determinar la combinación óptima de materiales y cuya mezcla cumpla con los parámetros establecidos en la normativa correspondiente.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Definiciones

2.1.1 Asfalto

De acuerdo con el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (2002), el asfalto se define como “betún sólido, semisólido o líquido, de color entre negro o pardo oscuro, encontrado en depósitos naturales u obtenido artificialmente como un residuo del petróleo” (p. I-3).

Es decir, se refiere a un material bituminoso compuesto por hidrocarburos, mismo el cual es originado de la destilación fraccionada del petróleo crudo. Es un material cuyo comportamiento a temperatura ambiente es sólido (o semisólido), mientras que frente a altas temperaturas tiene un comportamiento líquido; resultando así en una matriz aglutinante en la conformación de mezclas asfálticas. (Rodríguez, 2025)

2.1.2 Betún

El betún es un material pegajoso, altamente viscoso cuyo principal uso se encuentra en la construcción de vías como aglutinante para el cemento asfáltico. En el proceso de refinación del

petróleo, luego de obtener productos refinados de alto valor tales como gasolina, diésel y queroseno, el material restante (residuo corto) se conoce como betún. (Pipintakos et al., 2024)

2.1.3 Petróleo

El petróleo es una mezcla natural la cual está compuesta de hidrocarburos que se encuentran en una roca; el petróleo tiene origen en la descomposición de materia orgánica durante largos períodos de tiempo. (Petroecuador, 2013)

2.2. Ligantes asfálticos usados en pavimentos

- Emulsiones Asfálticas:

Consiste en un sistema heterogéneo de dos fases heterogéneas inmiscibles entre sí, tales como agua y asfalto. Para lograr una emulsión estable, se utiliza un agente emulsificante el cual forma una película protectora en las partículas de asfalto, misma que se rompe al entrar en contacto con el agregado, permitiendo así una correcta adherencia entre los materiales. Existen dos tipos de emulsiones asfálticas, catiónicas y aniónicas. (Salgado et al., 2025)

- Asfaltos cortados:

Son conocidos también como asfaltos diluidos, los cuales están compuestos principalmente por cemento asfáltico y un solvente refinado del petróleo, tal como el kerosene. Esta mezcla resulta en un producto más fluido que puede ser aplicado en vías a

temperaturas más bajas en comparación con aquellas a las que normalmente se trabaja el cemento asfáltico. (Salgado et al., 2025)

- Cemento asfáltico:

Consiste en productos refinados que se obtienen a partir de la destilación del crudo de petróleo, debido a su consistencia son apropiados para trabajos en pavimentación. De acuerdo con la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12-MTOP, generalmente es posible clasificar este material de acuerdo a su viscosidad, así como también debido a su grado de penetración (2013).

2.2.1 Cemento Asfáltico

El Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, establece que las vías normalmente deberán usar cemento asfáltico con un grado de penetración 60 – 70 en el caso de tráfico pesado; sin embargo, aquellas vías que estén sometidas a tráfico liviano podrán usar cemento asfáltico 85 – 100. (MOP, 2002)

2.2.1.1. Clasificación del cemento asfáltico por el grado de viscosidad

La viscosidad se puede definir como la resistencia que tiene un material a fluir. Los cementos asfálticos son designados por las siglas “AC” (*Asphalt Cement*) seguido de un número el cual indica la viscosidad del asfalto medida a 60°C (140°F), la cual es expresada en Poises. De manera general, la norma ASTM D-3381 establece seis tipos en base al grado de viscosidad:

- AC-2.5: viscosidad de 2500 Poises a 60°C (140°F)

- AC-5.0: viscosidad de 500 Poises a 60°C (140°F)
- AC-10: viscosidad de 1000 Poises a 60°C (140°F)
- AC-20: viscosidad de 2000 Poises a 60°C (140°F)
- AC-30: viscosidad de 3000 Poises a 60°C (140°F)
- AC-40: viscosidad de 4000 Poises a 60°C (140°F)

El motivo por el cual se mide la viscosidad a 60°C es porque es la temperatura máxima aproximada de la superficie durante el verano en Estados Unidos (Roberts et al., 1996). El grado de viscosidad en el cemento asfáltico indica qué tan rígido o fluido será el material, por lo cual tendrá diferentes usos. A medida que el número sea más bajo, el cemento asfáltico será más blando; mientras que si el número incrementa, será más rígido, por lo que tendrá un mejor desempeño en climas calurosos.

2.2.1.2. Clasificación del cemento asfáltico por el grado de penetración

También es posible clasificar el cemento asfáltico en función de su dureza o consistencia, razón por la cual se utiliza el ensayo de penetración. Si bien es cierto que la norma ASTM D5/D5M describe el método de ensayo, la clasificación en base al grado de penetración se encuentra en la norma ASTM D946, misma que describe cinco rangos estándar:

- Grado de penetración 40 – 50
- Grado de penetración 60 – 70
- Grado de penetración 85 – 100
- Grado de penetración 120 – 150

- Grado de penetración 200 – 300

Las cifras expresan los rangos mínimos y máximos de penetración que tiene un aguja a temperatura ambiente (25°C) en un determinado período de tiempo frente a una carga móvil.

2.2.1.3. Propiedades del cemento asfáltico

Es posible destacar ciertas características del cemento asfáltico las cuales aseguran un comportamiento óptimo: consistencia, pureza y seguridad.

Debido a su comportamiento termoplástico, el material es característico por su capacidad para fluir frente a diferentes temperaturas; de este modo, cuando ocurre el proceso de mezclado con agregados minerales en una planta asfáltica, la mezcla resultante tiende a endurecerse, lo que indica que su consistencia aumenta. Pese a que este aumento es esperado, es importante mantener un control ya que el endurecimiento excesivo puede causar fallas tempranas por agrietamiento en la mezcla asfáltica, reduciendo significativamente su vida útil (Asphalt Institute, 2007).

Por lo general, cuando el material sale de la refinería está libre de humedad. Sin embargo, es posible que los tanques de transporte tengan cierto grado de humedad, lo que puede causar que el agua se convierta en vapor y al mezclarse con el cemento asfáltico, éste puede formar espuma frente a temperaturas muy elevadas (175°C). El exceso de temperatura puede dar paso a la presencia de chispa o llama abierta, lo que se denomina como punto de inflamación; si bien es cierto que este punto se encuentra muy por encima de las temperaturas usadas en operaciones de pavimentación, es recomendable mantener un margen de seguridad (Asphalt Institute, 2007).

De acuerdo con Asphalt Institute (2007), dentro de las propiedades deseadas en la mezcla asfáltica se encuentran:

- Resistencia a Deformaciones Permanentes:

Es la capacidad del material de resistir surcos o ahuellamientos producidos por cargas repetidas. Depende de la fricción interna de los agregados minerales y la cohesión proporcionada por el cemento asfáltico. Si la mezcla es inestable, se producen surcos, ondulaciones o corrugaciones.

- Resistencia a la Fatiga:

Se define como la capacidad de resistencia a flexión bajo las cargas de los neumáticos. Puede presentarse como un tipo de falla denominado “piel de cocodrilo” y ocurre cuando el pavimento ha llegado al límite de su capacidad. Dentro de los factores se encuentra el envejecimiento o el espesor de la mezcla asfáltica.

- Resistencia a la Humedad

Ocurre cuando existe agua entre la película formada por el cemento asfáltico y el agregado mineral, lo que produce una rotura de la unión adhesiva; en consecuencia, se pueden presentar manchas en la superficie, junto con baches en la carpeta asfáltica.

- Durabilidad

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir factores tales como envejecimiento, desintegración del agregado y desprendimiento; mismos que resultan por el tráfico o

clima. Para mejorar la durabilidad del pavimento, se debe considerar maximizar el espesor de material que cubre a los agregados, así como también una compactación correcta, logrando así un sello contra el agua y el aire.

2.3. Materiales Pétreos

2.3.1 Definición

Los materiales pétreos son materiales naturales provenientes de la roca o con una calidad similar a ésta, en su mayoría son usados en el sector de la construcción. Al ser localizados en yacimientos naturales, suelen ser seleccionados y clasificados por su tamaño aunque también pueden ser obtenidos con ayuda de explosivos. (Secretaría de Economía, 2015)

2.3.2 Agregados pétreos

Los agregados minerales mantienen estrecha relación con la capacidad de soporte de carga de la mezcla asfáltica. De acuerdo con The Asphalt Institute, el término *agregado* se define como “material granular de composición mineral tal como arena, grava o piedra triturada, utilizado con un medio cementante para formar mortero o concreto, o por sí solo como en capas base”. (2007)

Los agregados minerales pueden ser naturales, en donde son extraídos a partir de formaciones rocosas; así como también pueden ser manufacturados, los cuales se derivan de materias primas que han sido alteradas ya sea de manera física o química (The Asphalt Institute, 2007).

2.3.3 Clasificación de los agregados minerales

Origen geológico

De acuerdo con The Asphalt Institute (2007), pueden dividirse en tres grupos:

- Rocas Sedimentarias:

Es el resultado de depósitos de sedimentos en el fondo de lagos o mares. El sedimento puede resultar en fragmentos de roca, restos orgánicos o productos químicos. Su principal distintivo es la estructura en capas.

- Rocas Ígneas:

Son aquellas que se forman por el enfriamiento y solidificación de magma proveniente de la corteza terrestre. Se dividen a su vez en rocas extrusivas e intrusivas; las primeras son aquellas que se forman al enfriarse en la superficie y tienen una estructura vítrea, mientras que el segundo tipo resultan del enfriamiento a grandes profundidades de la corteza, cuentan con una estructura cristalina.

- Rocas Metamórficas:

Se forman por la modificación de rocas sedimentarias o ígneas debido a altas presiones por movimientos dentro de la corteza. Son características porque los minerales se alinean en planos paralelos debido a la presión ejercida, denominado foliación. Un ejemplo de este tipo de rocas son el mármol, esquistos y la cuarcita.

Forma y angulosidad

La estabilidad del pavimento tiene relación directa con la morfología de los agregados minerales; de este modo, es posible clasificar la forma de las partículas en las siguientes categorías (Padilla, 2004):

- Redondeadas
- Irregulares
- Angulares
- Lajosos
- Alargadas

En el proceso de elaboración de mezclas asfálticas, los agregados minerales de preferencia son aquellos con partículas equidimensionales y angulares, ya que garantizan mayor resistencia al aplastamiento; mientras que los agregados planos son más susceptibles a la fragilidad estructural durante la compactación.

Tamaño

- Agregado grueso:

De acuerdo con el Sistema de Clasificación de Suelos (SUCS), el agregado grueso se refiere a la parte del agregado mineral retenido en el tamiz No. 4 (4.75 mm).

- Agregado fino:

Se define como la parte del agregado mineral que pasa el tamiz No. 4 (4.75 mm) y queda retenido en el tamiz No. 200 (75 μ m).

- Polvo mineral (filler):

Se define como filler a la parte del agregado que pasa el tamiz No. 200 (75 μ m).

2.3.4 Propiedades de los agregados pétreos

The Asphalt Institute (2007), menciona que dentro de las propiedades o características esperadas del agregado mineral se encuentran:

- Tenacidad

Es la propiedad que mide la capacidad del agregado frente al desgaste y degradación. A lo largo del proceso de pavimentación, los agregados minerales sufren una trituración adicional en momentos tales como la compactación y frente a las cargas de tráfico.

Mediante el uso de la Máquina de Los Ángeles, es posible evaluar la abrasión en los agregados pétreos, estableciendo así un límite permitido.

- Porosidad y Absorción

La porosidad se define como volumen total de vacíos en el agregado, lo que tiene estrecha relación con la resistencia; mientras que la absorción se refiere al ingreso de líquido en los poros permeables. Si el agregado tiene muchos vacíos, necesitará más cemento asfáltico para compensar el material que ha sido absorbido.

- Gravedad Específica

De manera general, la gravedad específica se define como la relación que existe entre el peso del volumen unitario del material y el peso del mismo volumen de agua a 23°C. Se clasifica, a su vez, en tres tipos: Gravedad Específica Aparente, Gravedad Específica Efectiva y Gravedad Específica Bulk; valores que son necesarios para calcular los vacíos de aire en la mezcla asfáltica.

- Tamaño máximo de partícula

El tamaño máximo se refiere a la abertura del tamiz más pequeño por el cual pasa el total del material; mientras que el tamaño máximo nominal se refiere a un tamaño de tamiz mayor que el primer tamiz que retiene un porcentaje del material, generalmente más del 10%.

- Forma de partícula y textura

La textura hace referencia a la rugosidad en la superficie del agregado mineral; por su parte, la forma del agregado se refiere al contorno geométrico del mismo, el cual puede ser angular, redondo, entre otros. Es importante que el material seleccionado sea angular ya que tiene una mayor trabazón al momento de compactarse, proporcionando así mayor estabilidad a la mezcla asfáltica.

2.4. Mezclas Asfálticas

Cepeda (2002, como se citó en Guarnica et al, 2005) define la mezcla asfáltica como una combinación de agregados minerales y ligante asfáltico, los cuales al ser mezclados adquieren una película uniforme que recubre el material. Las proporciones de los materiales determinan el comportamiento sus propiedades físicas.

Los agregados minerales conforman gran parte de la composición de la mezcla asfáltica, siendo ésta el 90% aproximadamente; mientras que el polvo mineral y el cemento asfáltico ocupan el 10% restante (Padilla, 2004).

2.4.1 Clasificación de mezclas asfálticas

Padilla (2004), menciona que existen diversos parámetros para establecer diferentes tipos de mezclas asfálticas, dentro de los cuales se encuentran:

Por fracciones de agregado pétreo

- Masilla asfáltica: Compuesto de polvo mineral junto con ligante, en este caso cemento asfáltico.
- Mortero asfáltico: Se refiere al agregado fino y masilla.
- Concreto asfáltico: El conjunto de agregado grueso, fino y filler, mezclados con ligante asfáltico.
- Macadam asfáltico: Principalmente se compone de agregado grueso y ligante asfáltico.

Por Tamaño del agregado pétreo

- Mezclas gruesas: Se considera una mezcla gruesa cuando el tamaño máximo del agregado supera los 10 mm.
- Mezcla fina: También es conocida como microaglomerados, consiste en un tipo de mezcla en donde el espesor mínimo de la mezcla está condicionado por el tamaño máximo del agregado, correspondiendo a un rango de dos a tres veces su dimensión.

Por Temperatura

- Mezclas asfálticas en caliente: Se fabrican a temperaturas en un rango de 150°C, dependiendo la viscosidad del ligante, es importante que tanto los agregados minerales así como el cemento asfáltico deben calentarse antes de la mezcla para así evitar que el cemento asfáltico no cubra adecuadamente los agregados.
- Mezclas asfálticas en frío: En este caso, la mezcla se realiza a temperatura ambiente, y por lo general, el ligante usado suele ser una emulsión asfáltica.

Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica

- Mezclas cerradas o densas: Aquella en donde la relación de vacíos no supera el 6%.
- Mezclas semi-densas: La proporción de vacíos se encuentra entre el 6% y el 10%.
- Mezclas abiertas: Es un tipo de mezcla en donde la relación de vacíos supera el 12%.
- Mezclas porosas o drenantes: Aquella en donde la proporción de vacíos supera el 20%.

Por la Estructura del agregado mineral

- Mezclas con esqueleto mineral: Son aquellas cuya resistencia se da principalmente al rozamiento interno de los agregados minerales, tal como en los concretos asfálticos.
- Mezclas sin esqueleto mineral: Por su parte, este tipo de mezclas adquieren resistencia principalmente por la cohesión de la masilla, tal como la masilla asfáltica.

Por la Granulometría

- Mezclas continuas: Se refiere a las mezclas asfálticas con una cantidad distribuida de distintos tipos de agregado mineral en la envolvente granulométrica.
- Mezclas discontinuas: Por su parte, son aquellas que cuentan con una cantidad limitada de agregados minerales en la envolvente.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE ENSAYO Y DISEÑO

3.1. Diseño de la mezcla asfáltica

Previo al diseño de la mezcla asfáltica, es necesario realizar una serie de ensayos a los distintos componentes de la mezcla, tal como agregados, cemento asfáltico, entre otros. Esto con el objetivo de que cada componente se encuentre dentro de los estándares normados y se logre un diseño óptimo.

3.1.1 Granulometría

Para la construcción de capas de rodadura, los agregados minerales deben cumplir con la granulometría establecida, mismos los cuales pueden estar constituidos por roca o grava

triturada, arena y relleno mineral. Es importante considerar que los agregados minerales deben ser materiales limpios, sólidos y de uniformidad razonable, exentos de materia no deseada tales como polvo. (MOP, 2002)

A continuación, se presenta la granulometría especificada en la norma MOP-001F-2002

Tabla 3.1: Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de la malla

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

Fuente: MOP-001 F-2002

Una vez realizada la granulometría, se obtuvieron valores dentro de los rangos especificados anteriormente, lo que permite una buena distribución de los agregados en la mezcla final, así como también permite una correcta resistencia a la deformación, es decir, un buen soporte en la estructura.

La granulometría además sirve para determinar el porcentaje óptimo de asfalto, mediante la elaboración de briquetas con distintos porcentajes de asfalto, evaluando así su comportamiento y comprobando que se encuentren dentro de los rangos especificados.

Para los agregados gruesos, se usan tamices con grandes aberturas, mientras que los agregados finos usan tamices con aberturas más pequeñas.

Figura 3.1: Tamizadora para agregados gruesos



Fuente: propia

3.1.2 Porcentaje Teórico de Cemento Asfáltico

El porcentaje teórico sirve como punto de partida para determinar el porcentaje de cemento asfáltico que debe ser incorporado a los agregados pétreos. De este modo, con los resultados de la granulometría es posible obtener un valor referencial. En este caso, se hará uso del método francés para obtener el porcentaje teórico de cemento asfáltico, en función de la superficie específica de los agregados minerales.

Una vez obtenido el porcentaje inicial de cemento asfáltico, se deben elaborar muestras con una variación de cemento asfáltico de 0.5%, considerando dos valores superiores y dos

valores inferiores, teniendo así un total de cinco porcentajes a ser ensayadas mediante el método Marshall y obtener el diseño de la mezcla asfáltica.

$$S = 0.17 * G + 0.33 * g + 2.30 * A + 12 * a + 135 * f \quad (\text{Ecuacion 3.1})$$

$$P = M * S^{\frac{1}{5}} \quad (\text{Ecuacion 3.2})$$

En donde:

G = material mayor a 3/8"

g = material entre los tamices 3/8" y No. 4

A = material entre los tamices No. 4 y No. 50

a = material entre los tamices No. 50 y No. 200

f = material que pasa el tamiz No. 200

P = contenido inicial de cemento asfáltico

M = módulo de riqueza (3.75 – 4.25)

3.1.3 Ensayo de Abrasión

El método de ensayo es un indicador de la calidad de agregados minerales que poseen una composición similar. Mediante el uso de la Máquina de los Ángeles, es posible medir la degradación de los áridos minerales mediante el impacto y trituración de esferas de acero usadas

en el ensayo, el número de esferas, procedimiento y requerimientos se consideran en base a parámetros establecidos en la normativa ASTM C-131.

Figura 3.2: Máquina de los Ángeles



Fuente: Propia

Procedimiento

Una vez tamizada la muestra, se considera cierta cantidad a ensayar en función a la siguiente tabla.

Tabla 3.2: Masa de los tamaños indicados (g). Gradación

TAMAÑO DEL TAMIZ		MASA DE LOS TAMAÑOS INDICADOS (g.) GRADACIÓN			
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±25	2500±10		
½ 12.5	3/8 9.5	1250±25	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: MOP-001 F-2002

En función al tamaño máximo nominal del agregado mineral, se considera uno de los cuatro tipos indicados: A, B, C o D. En este caso, debido a que el material pasa el tamiz 3/4" y queda retenido en el tamiz 1/2"; así como también el resto de material pasa el tamiz 1/2" y queda retenido en el tamiz 3/8", se determina que se trata de un agregado tipo B. De este modo, mediante la siguiente tabla es posible determinar la masa de la carga necesaria para ensayar la abrasión en la Máquina de los Ángeles.

Tabla 3.3: Masa de carga requerida

GRADACIÓN	NÚMERO DE ESFERAS	MASA DE LA CARGA, g.
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: ASTM C 131

De acuerdo a la norma, como se trata de un material tipo B, entonces son necesarias 11 esferas. La Máquina de los Ángeles gira a una velocidad aproximada de 30 RPM (revoluciones por minuto) hasta completar las 500 revoluciones; posteriormente se tamiza el material por el tamiz No. 12 y se realizan los cálculos respectivos.

Cálculos

Previo a realizar el cálculo del porcentaje de abrasión, primero es necesario calcular la masa final, es decir la masa que pasa el tamiz No. 12.

$$C = A - B \quad \text{(Ecuacion 3.3)}$$

En donde:

C = Masa final (g)

A = Masa inicial de la muestra (g)

B = Masa retenida en el tamiz No. 12 (g)

A continuación, determinamos el porcentaje de abrasión al establecer una relación entre la masa retenida en el tamiz No. 12 y la masa inicial de la muestra.

$$\% \text{ Abrasión} = \frac{B}{A} * 100 \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

El manual NEVI-12-MTOP establece que dentro de las especificaciones para agregados pétreos, los límites permisibles para abrasión en capas de rodadura de hormigón asfáltico en caliente son los siguientes (2013):

Tabla 3.4: Requerimientos para agregados gruesos

ENSAYOS	REQUERIMIENTO	
	ALTITUD (m.s.n.m)	
	< 3000	> 3000
Abrasión Los Ángeles	40% máx	35% máx

Fuente: NEVI 12-MTOP

3.1.4 Gravedad Específica del Agregado Mineral

En los siguientes ensayos, se obtendrán principalmente los siguientes resultados: Gravedad Específica Bulk, Gravedad Específica Saturada y Gravedad Específica Aparente, junto con el porcentaje de absorción. Estos datos mantienen estrecha relación con resultados que serán obtenidos posteriormente, tal como el porcentaje de vacíos en la mezcla.

3.1.4.1. Gravedad Específica del Agregado Grueso

El ensayo de Gravedad Específica del Agregado Grueso se realizará bajo los parámetros de la normativa ASTM C-127.

Procedimiento

Primero se considera una masa mínima de muestra en función al tamaño máximo nominal del agregado, en función de la siguiente tabla:

Tabla 3.5: Masa mínima de ensayo

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL mm (in)	MASA MÍNIMA DE ENSAYO kg (lb)
12.5 (1/2)	2 (4.4)
19 (3/4)	3 (6.6)
25 (1)	4 (8.8)
37.5 (1 1/2)	5 (11)
50 (2)	8 (18)
63 (2 1/2)	12 (26)
75 (3)	18 (40)
90 (3 1/2)	25 (55)
100 (4)	40 (88)
112 (4 1/2)	50 (110)
125 (5)	75 (165)
150 (6)	125 (276)

Fuente: ASTM C-127

Una vez obtenida la muestra representativa de agregado grueso, es necesario lavar el material para así evitar impurezas que puedan afectar el ensayo y se procede a secar la muestra en horno a temperatura constante de 110 ± 5 °C para luego dejar enfriar el agregado en un lapso de 1 a 3 horas y se sumerge la muestra en un período de 24 ± 4 horas.

Posteriormente, se retira la muestra del agua y de manera superficial se seca con ayuda de un paño hasta que la película superficial de agua desaparezca pero aún manteniendo los poros con agua, es decir, se quita el brillo excedente en el agregado. Luego de determinar el peso saturado de superficie seca, la muestra se coloca en una canasta de alambre suspendida en agua a temperatura ambiente en un lapso de 3 a 5 minutos, registrando así el peso sumergido. Finalmente, el agregado se lleva nuevamente al horno y se obtiene el peso seco del material

Cálculos

Obtenidos los tres valores A, B y C se procede con los cálculos respectivos

-Gravedad específica Bulk (Ge)

$$Ge = \frac{A}{B - C} \quad (\text{Ecuacion 3.5})$$

En donde:

A = Masa seca (g)

B = Masa parcialmente seca (g)

C = Masa sumergida (g)

-Gravedad específica Saturada (Ges)

$$Ges = \frac{B}{B - C} \quad (\text{Ecuacion 3.6})$$

-Gravedad específica Aparente (Gea)

$$Gea = \frac{A}{A - C} \quad (\text{Ecuacion 3.7})$$

-Porcentaje de Absorción

$$\%Absorción = \frac{B - A}{A} * 100 \quad (\text{Ecuacion 3.8})$$

3.1.4.2. Gravedad Específica del Agregado Fino

En ensayo de Gravedad Específica del Agregado Fino se realizará mediante las especificaciones de la normativa ASTM C-128

Procedimiento

Primero se debe considerar una muestra representativa de 1kg de agregado fino para luego secar la muestra en un horno a temperatura constante de 110 ± 5 °C hasta alcanzar una masa constante; luego se sumerge la muestra en agua y se deja en reposo en un período de 24 ± 4 horas.

Para obtener el peso de la muestra parcialmente seca, se esparsa el material sobre una superficie plana y se aplica una corriente de aire caliente de manera uniforme. Posteriormente, se coloca en un molde cónico y con ayuda de un pisón, se aplican 25 golpes distribuidos por capas; se obtiene el estado deseado al levantar el cono y la arena se desmorona ligeramente, pero manteniendo la forma.

Luego, se pesan alrededor de 500g de la muestra en estado superficialmente seco y se introduce el material en una matraz, para luego colocar agua; es necesario eliminar toda clase de vacíos en la muestra, por lo que se agita el equipo hasta que no queden burbujas o se usa una bomba de vacíos, mientras la muestra permanece en baño maría. Posteriormente, se completa con agua a temperatura de 23 ± 2 °C, registrando así el peso de la matraz, muestra y agua.

Finalmente, se retira la muestra y se seca en un horno a temperatura constante para obtener el peso seco final, obteniendo así cuatro parámetros: A, B, C y S.

Figura 3.3: Masa de la muestra seca



Fuente: Propia

Cálculos

-Gravedad Específica Bulk (Ge)

$$Ge = \frac{A}{B + S - C} \quad (\text{Ecuacion 3.9})$$

En donde:

A = Masa de la muestra seca (g)

B = Masa del matraz con agua (g)

C = Masa del matraz + agua + muestra (g)

S = Masa de la muestra parcialmente seca (g)

-Gravedad Específica Saturada (Ges)

$$Ges = \frac{S}{B + S - C} \quad (\text{Ecuacion 3.10})$$

-Gravedad Específica Aparente (Gea)

$$Gea = \frac{A}{B + A - C} \quad (\text{Ecuacion 3.11})$$

-Porcentaje de Absorción

$$\%Absorción = \frac{S - A}{A} * 10 \quad (\text{Ecuacion 3.12})$$

3.1.5 Equivalente de Arena

El ensayo de Equivalente de arena se realizará mediante las especificaciones de la norma ASTM D-2419. El objetivo principal del ensayo es determinar la proporción de arcilla o finos plásticos en el agregado fino. El equivalente de arena es una medida que establece el grado de

contaminación en el agregado fino, ya que los suelos granulares tienen una mezcla de partículas deseables y no deseables. (ASTM D-2419, 2022)

Procedimiento

Para empezar, se considera el material que pase por el tamiz No. 4. Luego de llenar la probeta con solución de trabajo hasta 4", se coloca la muestra con ayuda de un embudo y se golpea la probeta para liberar las burbujas de aire, luego se deja reposar por 10 ± 1 minutos. Una vez transcurrido el tiempo, se tapa la probeta y de manera horizontal, se agita a 90 ciclos en 30 segundos aproximadamente, sin exceder una distancia de 20 cm aproximadamente.

Posteriormente, se coloca un irrigador en el fondo de la probeta y se completa con solución hasta 15", para luego dejar reposar la probeta. Finalmente se consideran dos lecturas, el nivel del material en suspensión y luego se introduce un pisón para que descansa sobre la arena, obteniendo así la segunda lectura.

Figura 3.4: Probeta usada en el ensayo



Fuente: Propia

Cálculos

Al tener dos lecturas, tanto de arena como de arcilla, el equivalente de arena se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\%Eq.arena = \frac{Lectura\ B\ (Arena)}{Lectura\ A\ (Arcilla)} * 100 \quad (Ecuacion\ 3.13)$$

Es importante considerar que, el Ministerio de Obras Públicas exige un valor no menor a 45 para agregados en mezclas asfálticas de tipo I a IV. En caso de obtener un valor menor, se deben hacer dos ensayos adicionales y considerar un valor promedio. (MOP, 2002)

3.1.6 Ductilidad del Cemento Asfáltico

El ensayo de ductilidad se realizará en base a los parámetros establecidos en la norma ASTM D 113-19. El ensayo mide la capacidad de deformación que tiene el cemento asfáltico antes de llegar a la rotura, permitiendo así conocer el comportamiento frente a cargas vehiculares y otros factores. (ASTM D113-19, 2019)

Se coloca el cemento asfáltico caliente en un molde de bronce y se deja enfriar, para luego colocar el molde en un baño de agua a una temperatura de 25°C. Posteriormente, se colocan tres moldes en el ductilómetro y se ejerce tracción a una velocidad de 5cm/min, midiendo así el estiramiento hasta que la muestra se rompa.

Es importante considerar que, un cemento asfáltico con baja ductilidad puede resultar en un material rígido, por lo que el diseño final podría ser propenso a la fisura prematura.

3.1.7 Gravedad Específica del Cemento Asfáltico

El ensayo de gravedad específica se realizará bajo los parámetros establecidos en la norma ASTM D70-09. Busca determinar la gravedad específica, siendo ésta la relación entre la masa de un volumen y la masa de un volumen igual de agua, a una temperatura de 25°C.

Procedimiento

Luego de calentar el cemento asfáltico hasta que sea líquido, se coloca dentro de un picnómetro, para luego dejarlo enfriar y tomar la medida; posteriormente se completa el picnómetro con agua destilada y se sumerge en un baño maría a 25°C. Previamente, también deben ser considerados los pesos del picnómetro vacío y con agua destilada.

Cálculos

$$Gb = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} \quad (\text{Ecuacion 3.14})$$

A = Masa del picnómetro vacío (g)

B = Masa del picnómetro lleno con agua destilada (g)

C = Masa del picnómetro con cemento asfáltico (g)

D = Masa del picnómetro con cemento asfáltico y agua destilada (g)

3.1.8 Viscosidad Rotatoria

El ensayo de viscosidad se realiza en base a los parámetros establecidos en la normativa ASTM D4402. Determina la temperatura de mezclado y compactación.

Luego de calentar la muestra de cemento asfáltico junto con el contenedor, se vierte el material dentro del molde y se inicia la rotación del eje del equipo, lo que permite tomar la lectura de viscosidad.

3.1.9 Penetración

El ensayo se realiza en base a las especificaciones establecidas en la norma ASTM D 5.

Busca determinar la consistencia del cemento asfáltico mediante la penetración de una aguja estándar en una muestra, bajo condiciones específicas tales como: temperatura a 25°C, el peso de la aguja es 100g y el tiempo de duración es 5s. Posteriormente, se realiza el promedio de al menos tres lecturas; la unidad de medida es décima de milímetro.

3.2. Ensayo Marshall

La metodología del ensayo Marshall busca determinar la cantidad óptima de cemento asfáltico para una combinación de agregados minerales. La proporción de materiales pretende establecer un conjunto entre las partículas de agregado pétreo y ligante de tal manera que puedan soportar cambios volumétricos debido a las cargas por acción del tráfico, además de trabajar de manera adecuada frente a otros factores tales como el clima. (Sequeira & Cervantes, 2014)

Como parte del proceso preliminar, es necesario elaborar briquetas para poder ensayar. The Asphalt Institute (2007), establece que se deben elaborar 3 especímenes por cada porcentaje de asfalto teórico, teniendo en cuenta que se requiere de un rango de 5 porcentajes con dos puntos de control superiores e inferiores respecto al valor estimado. Las briquetas deberán ser compactadas por cierto número de golpes en función al tipo de tráfico, sea liviano, medio o pesado.

3.2.1 Gravedad Específica Bulk de la briketa

Se refiere a la relación entre la masa seca y el volumen total a una determinada temperatura y la masa de un volumen igual de agua destilada.

$$Gmb = \frac{A}{B - C} \quad (\text{Ecuacion 3.15})$$

En donde:

A = Masa seca en el aire (g)

B = Masa saturada con superficie seca (g)

C = Masa de la muestra en agua (g)

3.2.2 Gravedad Específica Bulk del agregado combinado

Es el promedio de las gravedades específicas bulk de las fracciones del agregado mineral que componen la mezcla asfáltica.

$$Gsb = \frac{100}{\sum_i^n \frac{P_i}{G_i}} \quad (\text{Ecuacion 3.16})$$

En donde:

Pi = Porcentaje de mezcla

Gi = Peso específico de cada fracción de agregado

3.2.3 Estabilidad y Flujo

El ensayo se realiza a partir de las especificaciones y requerimientos establecidos en la normativa ASTM D 6927.

Las briquetas son ensayadas en la prensa Marshall para obtener simultáneamente los valores de estabilidad y flujo correspondientes. De acuerdo con The Asphalt Institute, se define a la estabilidad como la resistencia máxima de una probeta frente a la carga por tráfico; mientras que el flujo es la deformación total que experimenta la briqueta (2007). Ambos parámetros tienen condiciones específicas tales como temperatura, unidades de medición.

Los especímenes a ensayar deben primero ser sumergidos en agua a una temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante aproximadamente 30 minutos, mientras los cabezales del equipo también se calientan a una temperatura entre $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $38\text{ }^{\circ}\text{C}$. Posteriormente, se seca la briqueta y se ensaya en la prensa Marshall en menos de 30 segundos, aplicando una carga a velocidad constante de 50.8 mm/min hasta llegar a la falla de la muestra.

La norma MOP-001 F-2002, establece parámetros mínimos y máximos para estabilidad y flujo en función al tipo de tráfico ya sea liviano, medio o pesado.

Tabla 3.6: Requerimientos para Estabilidad y Flujo

TIPO DE TRAFICO	MUY PESADO		PESADO		MEDIO		LIVIANO	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
No. Golpes/Cara	75		75		50		50	
Estabilidad (lb)	2200	-	1800	-	1200	-	1000	2400
Flujo (in/100)	8	14	8	14	8	16	8	16

Fuente: MOP-001 F-2002

Figura 3.5: Prensa Marshall



Fuente: Propia

3.3. Ensayos Complementarios y Análisis Volumétrico

El ensayo RICE se realiza a partir de los parámetros y especificaciones establecidos en la norma ASTM D 2041. El ensayo permite determinar la gravedad específica teórica máxima de mezclas bituminosas, parámetro clave para determinar el cálculo de vacíos de aire y la cantidad de ligante asfáltico absorbido por el agregado.

Es necesario considerar una masa inicial de 2200g de mezcla asfáltica suelta, la cual se coloca en un recipiente volumétrico para proceder a sumergirlo en agua, sometiéndolo así a una presión de vacío por 15 minutos, eliminando así el aire retenido en los poros granulares.

3.3.1 Gravedad Específica Máxima Teórica (RICE – Gmm)

$$Gmm = \frac{A}{A + D - E} \quad (\text{Ecuacion 3.17})$$

Donde:

A = Masa de la muestra seca en el aire (g)

D = Masa del contenedor y tapa con agua a 25°C (g)

E = Masa del contenedor + tapa + muestra + agua a 25°C (g)

3.3.2 Gravedad Específica Efectiva Medida

$$Gse1 = \frac{100 - Pb}{\frac{100}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}} \quad (\text{Ecuacion 3.18})$$

Donde:

Pb = Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla

Gmm = Gravedad específica máxima medida

Gb = Gravedad específica del cemento asfáltico

3.3.3 Parámetros Volumétricos de Diseño

Vacíos de aire

Se refiere a los espacios de aire que se encuentran entre las partículas de agregado pétreo luego de ser cubiertas por el ligante asfáltico. La norma MOP-001-F 2002 establece un rango de valores permisibles en función al tipo de estructura. Los valores varían entre capa de rodadura, subbase y base; en este caso, los límites de vacíos de aire es de 3 a 5 (2002).

$$Va = \left(1 - \frac{Gmb}{Gmm}\right) * 100 \quad (\text{Ecuacion 3.19})$$

Donde:

Gmb = Gravedad específica Bulk de la mezcla

Gmm = Gravedad específica máxima medida en el ensayo RICE

Vacíos en el Agregado Mineral (VAM)

Se refiere al volumen de espacio vacío entre las partículas de agregado pétreo en una mezcla asfáltica, incluyendo vacíos de aire y ligante asfáltico. (Guarnica et al, 2005)

$$VAM = 100 - \left(\frac{Gmb * Ps}{Gsb}\right) \quad (\text{Ecuacion 3.20})$$

En donde

Gmb = Gravedad específica Bulk de la mezcla

Gsb = Gravedad específica del agregado

Ps = Porcentaje de agregado mineral respecto al peso total de la mezcla (Ps = 100 – Pb)

Vacíos llenos con asfalto (VAF)

Es el porcentaje de volumen de vacíos entre las partículas de agregado que ha sido ocupado con cemento asfáltico. (Guarnica et al, 2005)

$$VAF = \left(\frac{VAM - Va}{VAM} \right) * 100 \quad (\text{Ecuacion 3.21})$$

3.3.4 Relación Filler – Asfalto

De acuerdo con Rodríguez & Díaz (2021), filler es todo aquel material fino que pasa el tamiz No. 200, mismo el cual puede ser una fracción de agregado fino, cal, entre otros. Bajo este contexto, la relación Filler/Asfalto o Filler/Betún se refiere a la relación entre las partículas que pasan el tamiz No. 200 y el cemento asfáltico efectivo.

$$\frac{R_f}{a} = \frac{P200}{Pbe} \quad (\text{Ecuacion 3.22})$$

Donde:

P200 = Porcentaje de partículas que pasan el tamiz No. 200

Pbe = Porcentaje de asfalto efectivo

Porcentaje de Asfalto Efectivo

Es la porción de cemento asfáltico que queda como una capa exterior que rodea al agregado pétreo. (Guarnica et al, 2005)

$$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} * Ps \quad (\text{Ecuacion 3.23})$$

Donde

Pba = Porcentaje de asfalto absorbido

Porcentaje de Asfalto Absorbido

Se representa como un porcentaje de la masa del agregado. Es decir, es el peso del cemento asfáltico respecto al peso del agregado mineral. (Guarnica et al, 2005)

$$Pba = 100 * \frac{Gse - Gsb}{Gse * Gsb} * Gs \quad (\text{Ecuacion 3.24})$$

Donde

Gse = Gravedad específica Efectiva del agregado mineral

Gsb = Gravedad específica Bulk del agregado

Gs = Gravedad específica del cemento asfáltico

CAPÍTULO 4: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

4.1. Procedencia de las Muestras

Como se mencionó anteriormente, parte importante de un apropiado diseño de mezclas asfálticas es el tipo de material granular con el que se trabaja, debido a que éste tiene relación directa con el comportamiento de la estructura final frente a las cargas de tráfico, clima, entre otros. Debido a esto, previo a la realización de ensayos, fue necesario encontrar una mina para poder realizar el análisis respectivo. Con ayuda de un Geoportal de Catastro Minero, se optó por escoger la mina Carlos Alberto, ubicada en la Parroquia de Guayllabamba, Provincia de Pichincha.

Figura 4.1: Ubicación Mina Carlos Alberto



Fuente: Geoportal Catastro Minero

4.2. Granulometría

Tabla 4.1: Granulometría del agregado mineral

MEZCLAS DE AGREGADOS												
Tamiz #	1	3.4	1.2	3.8	4	8	16	30	50	100	200	p #200
Tz mm.	25.4	19	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	p 0,075
mat. A	100.00	100.00	100.00	100.00	85.99	71.97	57.93	44.12	25.93	13.62	6.20	
mat. B	100.00	100.00	96.17	59.36	0.78	0.63	0.59	0.54	0.48	0.40	0.12	
mat. C	100.00	99.42	54.59	9.07	0.29	0.20	0.19	0.19	0.16	0.14	0.05	
mat. D	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
mezcla	100.00	99.83	85.23	60.53	34.72	29.04	23.41	17.87	10.56	5.61	2.53	
Ret.Ac.	0.00	0.17	14.77	39.47	65.28	70.96	76.59	82.13	89.44	94.39	97.47	2.53
Ret.Parc.	0.00	0.17	14.60	24.70	25.81	5.68	5.63	5.54	7.30	4.95	3.08	
peso	0.00	1.91	160.58	271.69	283.93	62.48	61.94	60.93	80.33	54.49	33.87	
p. acum.	0.00	1.91	162.49	434.18	718.11	780.59	842.53	903.46	983.80	1038.29	1072.16	1100.00
Espec mín	100	90	---	56	35	23	---	---	5	---	2	
Espec máx	100	100	---	80	65	49	---	---	19	---	8	

Fuente: Propia

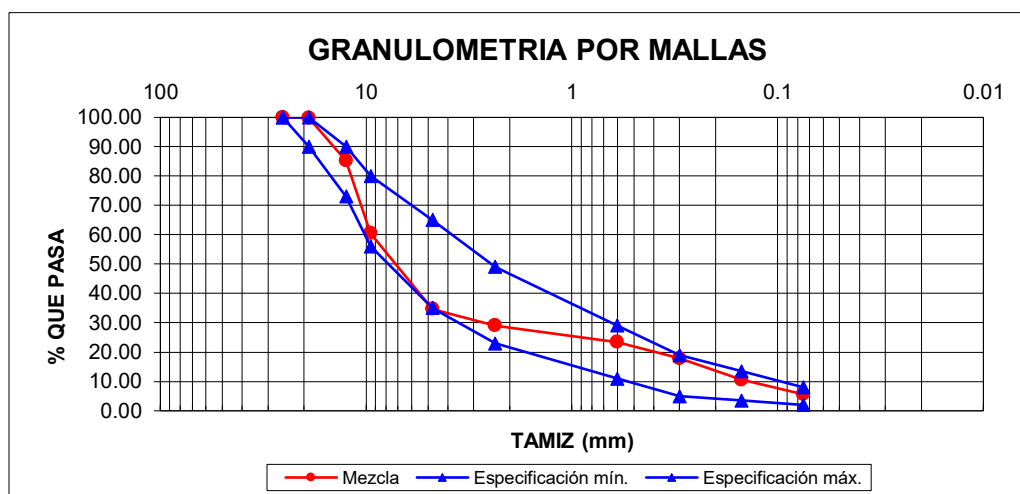
Una vez realizada la granulometría del agregado mineral, es posible determinar el porcentaje de mezcla de cada fracción de material granular.

Tabla 4.2: Porcentaje de mezcla del agregado

% DE MEZCLA		
A	0.50	50
B	0.25	25
C	0.25	25

Fuente: Propia

Figura 4.2: Granulometría para el diseño



Fuente: Propia

El porcentaje de mezcla será de utilidad para conocer la distribución de agregado mineral que tendrán las briquetas en el ensayo Marshall.

4.3. Porcentaje Teórico de Cemento Asfáltico en la mezcla

En función a la granulometría y el porcentaje de mezcla, se obtiene el porcentaje teórico de cemento asfáltico, mismo el cual sirve como punto de partida para encontrar el porcentaje óptimo de asfalto.

Figura 4.3: Cálculo del Porcentaje de Asfalto

Cálculo del Porcentaje de AP-3

G =	39.47	0.39471	M =	3.75-4.25
g =	25.81	0.25812		
A =	24.15	0.24153		
a =	8.03	0.08033		
f =	2.53	0.02531		
S =	5.08861	P (%) =	5.54	

Fuente: Propia

El resultado obtenido es 5.54%, sin embargo se reduce al inmediato inferior, es decir 5.50%. Como se mencionó anteriormente, es necesario elaborar tres especímenes por cada variación de asfalto, considerando que se debe ensayar junto con dos puntos de control superiores e inferiores, los porcentajes a analizar serían: 4.50%; 5.00%; 5.50%; 6.00%; 6.50%

4.4. Ensayos de Agregados Minerales

Tabla 4.3: Resultados de los ensayos de Agregados Minerales

ENSAYOS	PARÁMETROS	MATERIALES			LÍMITES PERMISIBLES
		GRUESO	MEDIO	FINO	
ABRASIÓN LOS ÁNGELES	% ABRASIÓN	27	27		MÁX 40%
GRAVEDAD ESPECÍFICA	BULK (g/cm ³)	2.503	2.431	2.520	-
	SSS (g/cm ³)	2.556	2.505	2.582	-
	APARENTE (g/cm ³)	2.645	2.626	2.687	-
	% ABSORCIÓN	2.15	3.04	2.47	-
EQUIVALENTE DE ARENA	% EQUIVALENTE DE ARENA			72	MIN 45%

Fuente: Propia

4.5. Ensayos de Cemento Asfáltico

Tabla 4.4: Resultados de los ensayos de cemento asfáltico

ENSAYOS	ASFALTO AC-20	LÍMITES PERMISIBLES
DUCTILIDAD (cm)	100	MIN 50
GRAVEDAD ESPECÍFICA	1.013	-
VISCOSIDAD ROTATORIA (cP)	382.73	MIN 300
PENETRACIÓN (0.1 mm)	74	MIN 60

Fuente: Propia

4.6. Elaboración de Briquetas para el ensayo Marshall

Para la elaboración de las briquetas, se necesitan 1100 g de material en función al análisis granulométrico realizado anteriormente; de acuerdo con el porcentaje de mezcla, se obtienen las cantidades de cada fracción hasta lograr el peso requerido.

Figura 4.4: Elaboración de las muestras a ensayar



Fuente: Propia

El material debe calentarse en un horno a temperatura constante, posteriormente se mezcla en conjunto con el cemento asfáltico, el cual también debe tener una temperatura determinada en función a los ensayos respectivos, esto para lograr una mezcla uniforme y conseguir que el cemento asfáltico cubra adecuadamente todas las fracciones de agregado mineral.

Luego de mezclar apropiadamente el material, hasta que el agregado no presente superficies “limpias”, se procede a compactar los especímenes. Para esto, se coloca la mezcla en un molde cilíndrico previamente calentado y se distribuye por capas, para asegurar que los agregados finos puedan distribuirse apropiadamente, con ayuda de una varilla se compacta de manera uniforme un total de 15 golpes; luego la muestra se cubre con papel y se coloca en un compactador Marshall, para proporcionar 75 golpes por cada cara en la muestra.

Figura 4.5: Mezcla de los agregados y cemento asfáltico



Fuente: Propia

Figura 4.6: Compactador Marshall



Fuente: Propia

Figura 4.7: Briquetas iniciales



Fuente: Propia

Inicialmente, al momento de realizar el análisis granulométrico, una revisión preliminar dio aviso de que la relación filler/betún se encontraba por debajo de los límites establecidos en normativa (0.8 a 1.2), razón por la cual existía la posibilidad de que el diseño final tenga una mayor cantidad de vacíos. Es por esta razón, que se decidió trabajar inicialmente con cinco briquetas para evaluar el comportamiento final del conjunto de materiales. Posteriormente,

debido a que la información obtenida no era suficiente, se optó por completar el número de briquetas faltantes y realizar el diseño para así obtener el porcentaje óptimo de asfalto.

Figura 4.8: Total de briquetas a ensayar



Fuente: Propia

4.7. Ensayo Marshall

Se realiza el ensayo en la prensa Marshall para así obtener los resultados de estabilidad y flujo, parámetros que permiten analizar el comportamiento final de la mezcla asfáltica; además, este ensayo ayuda a encontrar los vacíos presentes dentro de la mezcla asfáltica.

-Resultados del ensayo Marshall

Tabla 4.5: Resultados del ensayo Marshall

Briqueta	% Asfalto	Espesor del espécimen (mm)	Diámetro del espécimen (mm)	Peso en aire (gr)	Peso en agua (gr)	Peso sat sup.seca (gr)	Gravedad Específica Bulk Gmb (g/cm3)	Volumen Briqueta	Gravedad Específica Bulk del agregado Gsb (g/cm3)	Estabilidad (lbf)			Flujo (in)
										Medida	Factor Corrección	Medida Corregida	
1	4.50%	59.86	94.35	1141.30	627.20	1146.00	2.200	518.80	2.493	2450.00	1.00	2450.00	12.00
2		67.20	101.56	1136.84	623.22	1145.40	2.177	522.18		2000.00	1.00	2000.00	11.00
3		65.85	101.62	1143.03	628.66	1148.37	2.199	519.71		2525.00	1.00	2525.00	10.50
Prom		64.30	99.18	1140.39	626.36	1146.59	2.192	520.23		2325.00		2325.00	11.17
4	5.00%	59.03	94.61	1146.00	625.32	1149.83	2.185	524.51	2.493	3350.00	1.00	3350.00	10.75
5		65.64	101.63	1146.52	635.90	1153.18	2.216	517.28		2750.00	1.00	2750.00	9.50
6		65.85	101.60	1145.09	637.13	1150.83	2.229	513.70		3000.00	1.00	3000.00	11.00
Prom		63.51	99.28	1145.87	632.78	1151.28	2.223	518.50		3033.33		3033.33	10.42
7	5.50%	59.02	94.57	1150.62	639.65	1155.59	2.230	515.94	2.493	3500.00	1.00	3500.00	10.75
8		66.16	101.51	1153.49	642.05	1160.70	2.224	518.65		3100.00	1.00	3100.00	11.00
9		65.29	101.43	1147.80	637.92	1152.40	2.231	514.48		3200.00	0.96	3072.00	10.50
Prom		63.49	99.17	1150.64	639.87	1156.23	2.228	516.36		3266.67		3224.00	10.75
10	6.00%	59.83	94.53	1158.01	645.45	1164.10	2.233	518.65	2.493	3875.00	1.00	3875.00	11.00
11		65.60	101.62	1155.29	645.32	1160.35	2.243	515.03		3400.00	1.00	3400.00	12.00
12		65.08	101.83	1160.69	648.10	1163.83	2.251	515.73		3050.00	1.00	3050.00	11.00
Prom		63.50	99.33	1158.00	646.29	1162.76	2.242	516.47		3441.67		3441.67	11.33
13	6.50%	59.35	94.44	1163.19	646.35	1166.52	2.236	520.17	2.493	3250.00	1.00	3250.00	10.50
14		64.91	101.60	1156.21	647.68	1158.92	2.262	511.24		3250.00	1.00	3250.00	11.50
15		65.28	101.56	1166.21	657.37	1167.47	2.286	510.10		3050.00	1.00	3050.00	11.75
Prom		63.18	99.20	1161.87	650.47	1164.30	2.261	513.84		3183.33		3183.33	11.25

Fuente: Propia

4.8. Ensayo RICE

Para el ensayo RICE es necesario obtener 2200 g de material, al igual que en el ensayo Marshall, a partir del análisis granulométrico se obtienen las cantidades de cada fracción de material angular para poder obtener el peso deseado.

En este caso, se realizó el ensayo RICE para la briqueta con un porcentaje teórico de cemento asfáltico de 5.50%, es decir para el valor central de las muestras; para el resto de porcentajes, se usarán expresiones para encontrar las gravedades específicas máximas teóricas.

-Gravedad específica máxima de la mezcla (5.50% de asfalto)

Tabla 4.6: Gravedad Específica Máxima de la mezcla

Masa de la muestra seca en aire (g)	A	2273.20
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (g)	D	7419.40
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (g)	E	8747.60

Gmm1	2.406
------	-------

Fuente: Propia

-Gravedad específica máxima de la mezcla para el resto de porcentajes

Tabla 4.7: Gravedad Específica Máxima Teórica

Gravedad específica máxima teórica 4.5%			Gmm 4.5
Porcentaje de asfalto en la mezcla	Pb	4.50	2.441
Porcentaje de agregado en la mezcla	Ps	95.50	
Gravedad específica máxima teórica 5.0%			Gmm 5.0
Porcentaje de asfalto en la mezcla	Pb	5.00	2.423
Porcentaje de agregado en la mezcla	Ps	95.00	
Gravedad específica máxima teórica 6.0%			Gmm 6.0
Porcentaje de asfalto en la mezcla	Pb	6.00	2.388
Porcentaje de agregado en la mezcla	Ps	94.00	
Gravedad específica máxima teórica 6.5%			Gmm 6.5
Porcentaje de asfalto en la mezcla	Pb	6.50	2.371
Porcentaje de agregado en la mezcla	Ps	93.50	

Fuente: Propia

-Resultados del ensayo RICE

Tabla 4.8: Resultados del ensayo RICE

Briqueta	% Asfalto	Vacíos aire (%)	Gravedad Específica Bulk del agregado Gsb (g/cm3)	Gravedad Específica Aparente del agregado Gsa (g/cm3)	Gravedad Específica Máxima Teórica Gmm (g/cm3)	Gravedad Específica Máxima Medida RICE (g/cm3)	Gravedad Específica Efectiva del Agregado Gse (g/cm3)	Asfalto Absorbido	Asfalto Efectivo	Relación Filler/Betún (F/B)	% Volumen agregado / Volumen Total	% Vacíos Agregado Mineral (VAM)	% Vacíos Llenos de Asfalto (VAF)
1	4.50%	9.88	2.493	2.661							84.28%	15.72%	37.16
2		10.81									83.41%	16.59%	34.84
3		9.90									84.26%	15.74%	37.11
Prom		10.20									2.339	2.441	2.615
4	5.00%	9.83	2.493	2.661							83.27%	16.73%	41.24
5		8.53									84.47%	15.53%	45.08
6		8.01									84.95%	15.05%	46.79
Prom		8.79									2.323	2.423	2.615
7	5.50%	7.29	2.493	2.661							84.54%	15.46%	52.83
8		7.54									84.31%	15.69%	51.91
9		7.25									84.58%	15.42%	52.96
Prom		7.36									2.307	2.406	2.615
10	6.00%	6.51	2.493	2.661							84.20%	15.80%	58.83
11		6.07									84.59%	15.41%	60.61
12		5.76									84.87%	15.13%	61.94
Prom		6.11									2.292	2.388	2.615
13	6.50%	5.69	2.493	2.661							83.88%	16.12%	64.73
14		4.62									84.83%	15.17%	69.58
15		3.58									85.75%	14.25%	74.90
Prom		4.63									2.277	2.371	2.615

Fuente: Propia

Una vez obtenidos los resultados de RICE y el Ensayo Marshall, se procede a encontrar el porcentaje óptimo de asfalto.

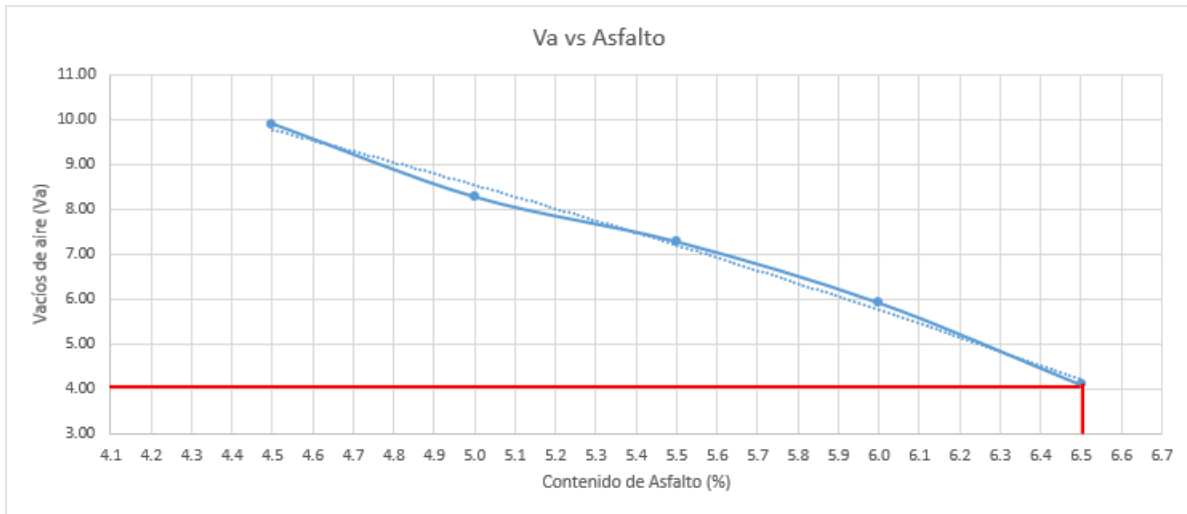
4.9. Porcentaje Óptimo de Asfalto

The Asphalt Institute, indica que para obtener el porcentaje óptimo de asfalto es necesario establecer un promedio entre los siguientes parámetros: 4% de vacíos de aire; máxima estabilidad y máxima gravedad específica. (2007)

Por lo cual, se debe realizar una gráfica que establezca una relación entre los parámetros mencionados anteriormente y el porcentaje de cemento asfáltico. En la gráfica de vacíos de aire,

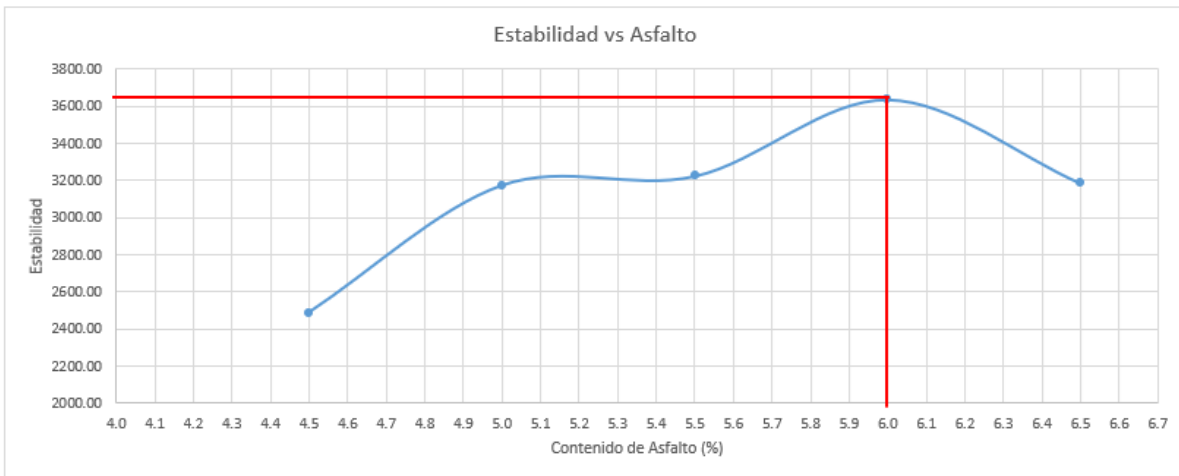
se debe trazar una línea horizontal en el 4%; mientras que en las curvas de estabilidad y gravedad específica, se traza una línea en el valor máximo y se obtiene un valor de porcentaje de asfalto, finalmente se debe realizar un promedio de esos tres valores.

Figura 4.9: Curva Va vs Asfalto



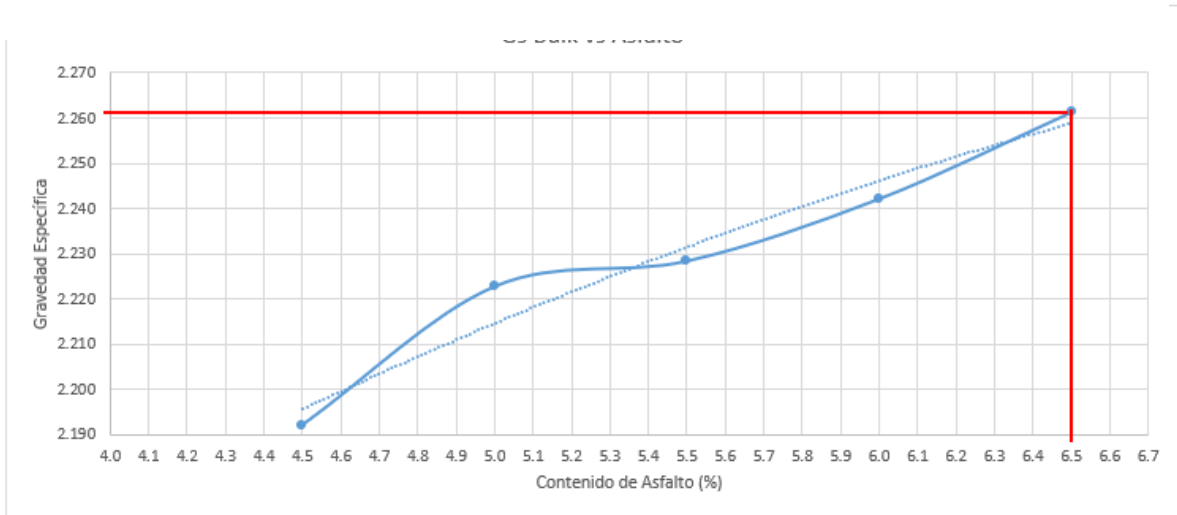
Fuente: Propia

Figura 4.10: Curva Estabilidad vs Asfalto



Fuente: Propia

Figura 4.11: Curva Gs Bulk vs Asfalto



Fuente: Propia

De este modo, el promedio de los valores antes mencionados es el siguiente

Tabla 4.9: Valor óptimo de asfalto

Asfalto óptimo	
Va	6.5
Máx Estabilidad	6.0
Máx Bulk	6.5
promedio	6.33

Fuente: Propia

En este caso, el porcentaje óptimo de asfalto es 6.33%.

CAPÍTULO 5: DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA ÓPTIMA

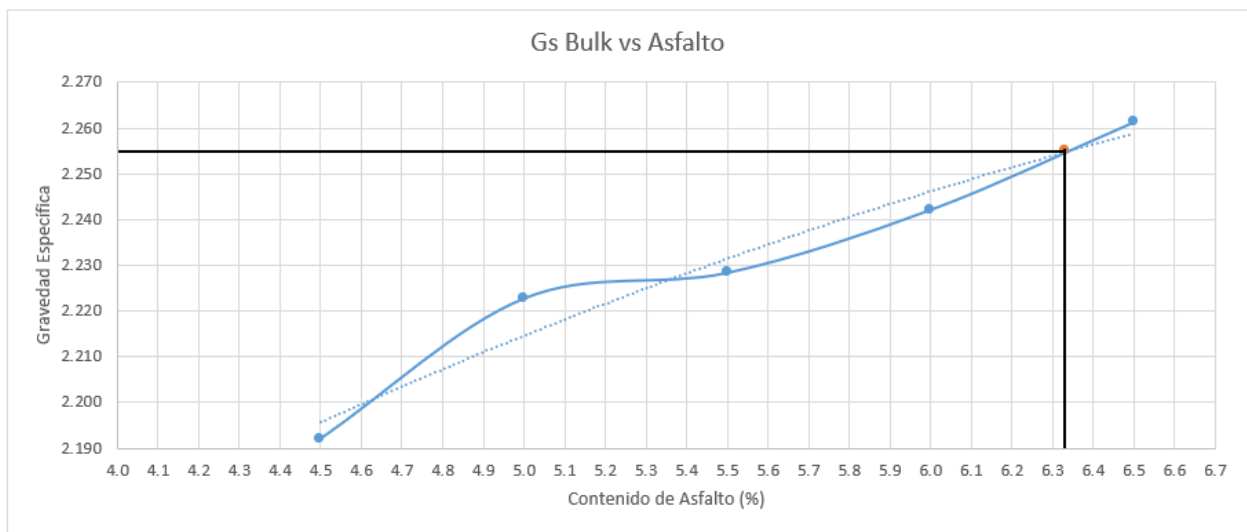
5.1. Presentación de Resultados

Luego de obtener el porcentaje óptimo de asfalto, es necesario determinar las propiedades de la mezcla asfáltica y comparar con los criterios establecidos por normativa local. En este caso,

es necesario establecer gráficas que relacionen el contenido de asfalto y parámetros tales como VAM, VAF, Flujo, Estabilidad, entre otros.

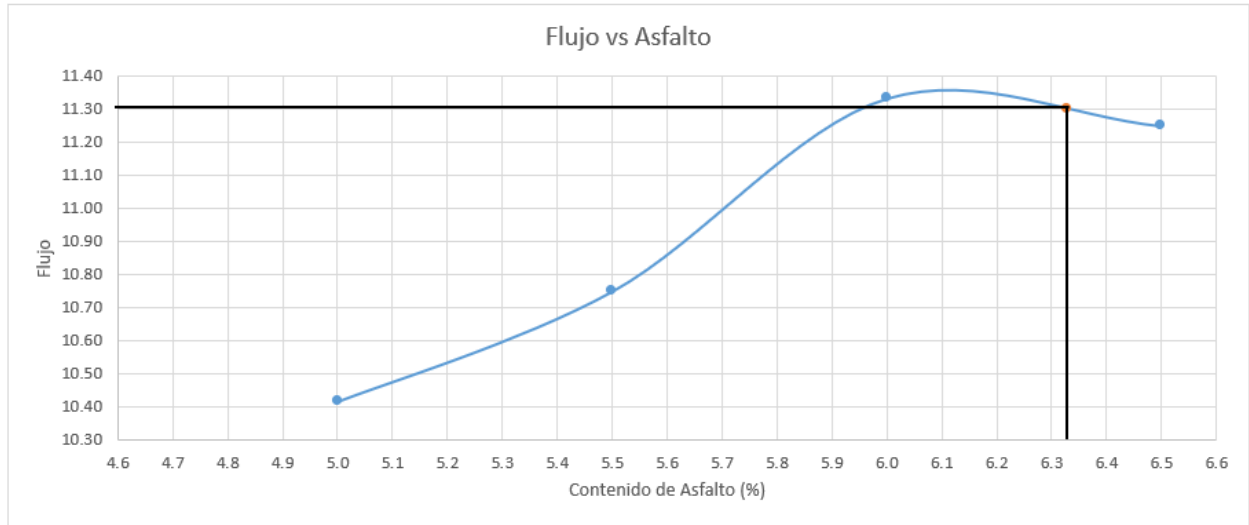
Para conocer las propiedades de la mezcla asfáltica, se traza una línea vertical en el eje correspondiente a 6.33% de cemento asfáltico y en el eje de las ordenadas, se determina la propiedad correspondiente.

Figura 5.1: Gs Bulk vs Asfalto óptimo



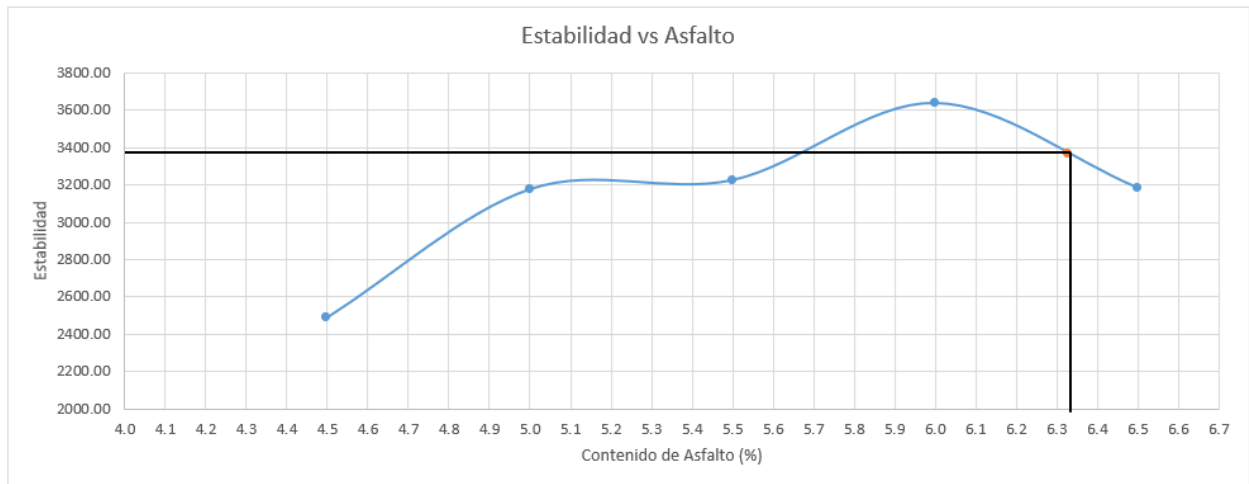
Fuente: Propia

Figura 5.2: Flujo vs Asfalto óptimo



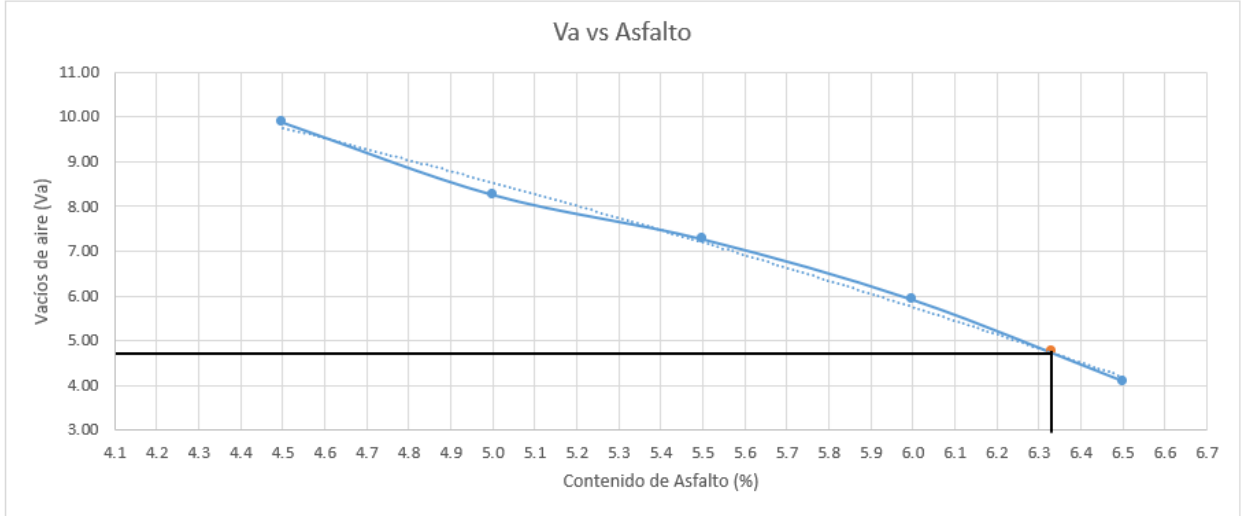
Fuente: Propia

Figura 5.3: Estabilidad vs Asfalto óptimo



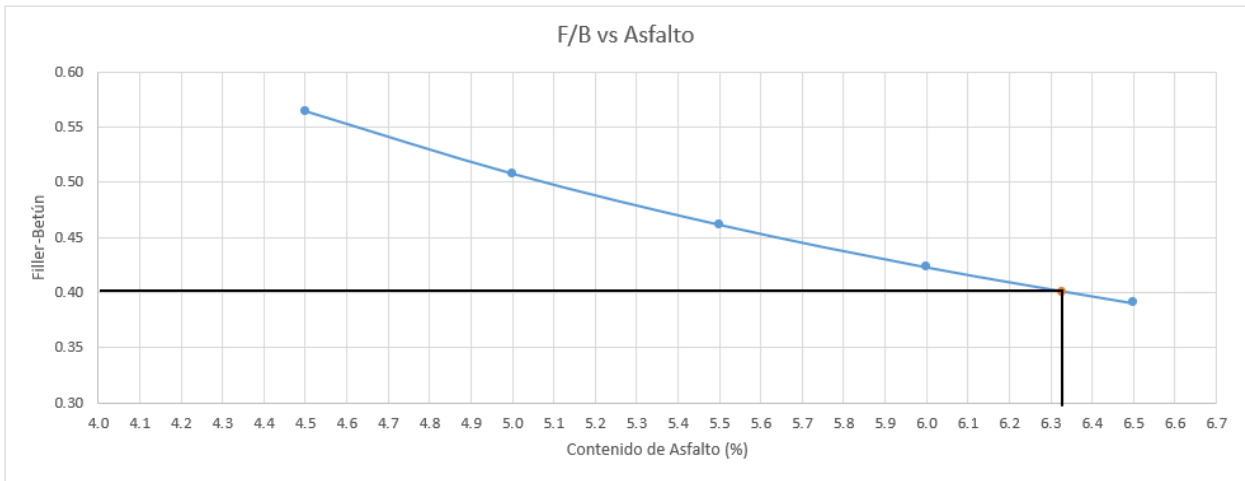
Fuente: Propia

Figura 5.4: Vacíos de aire vs Asfalto óptimo



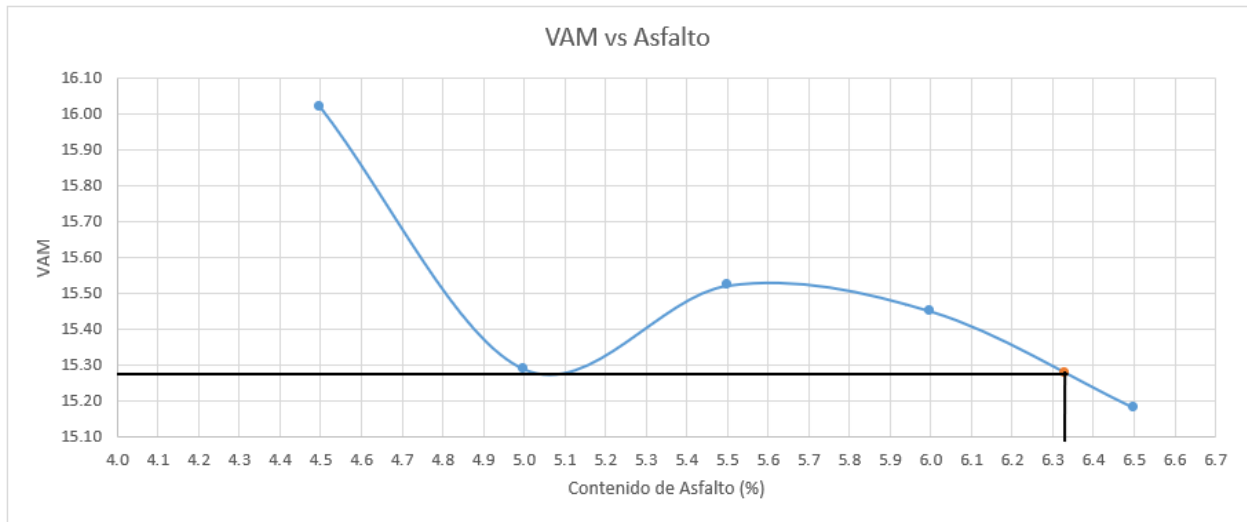
Fuente: Propia

Figura 5.5: Filler-Betún vs Asfalto óptimo



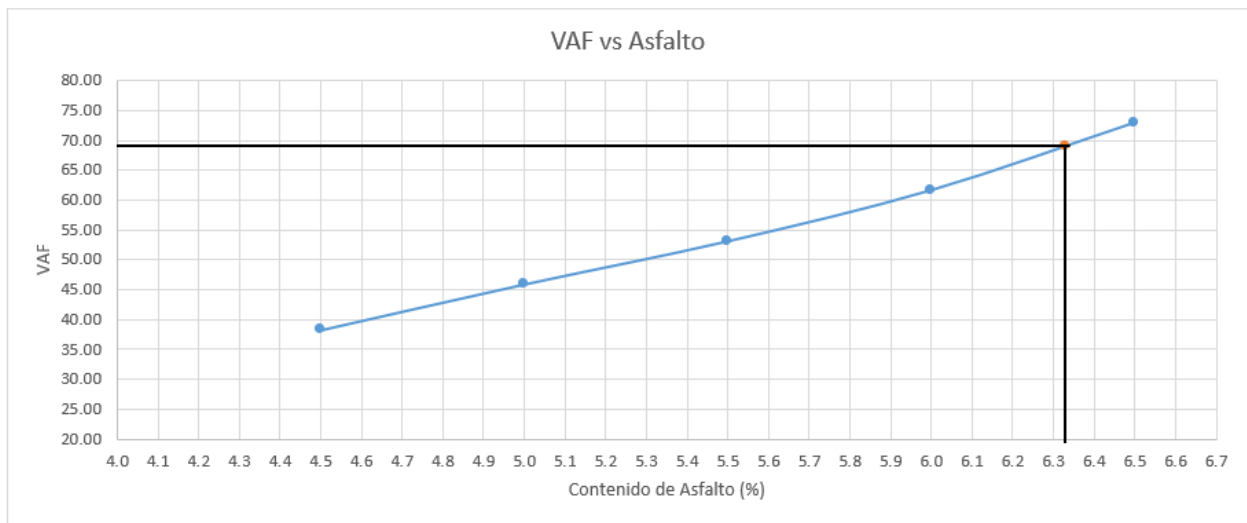
Fuente: Propia

Figura 5.6: VAM vs Asfalto óptimo



Fuente: Propia

Figura 5.7: VAF vs Asfalto



Fuente: Propia

Finalmente, se presenta un cuadro resumen con las propiedades de la mezcla asfáltica, comparado con los límites permisibles en la norma MOP-001 F-2002.

Tabla 5.1: Especificaciones para la mezcla asfáltica en caliente con 6.33% de cemento asfáltico

ESPECIFICACIONES PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON 6.33% DE CEMENTO ASFÁLTICO					
DESCRIPCIÓN	UNIDADES	MOP-001 F-2002		RESULTADO	ESTADO
		MIN	MAX		
Flujo	in	8	14	11.3	cumple
Estabilidad	lbf	2200	-	3367	cumple
Vacíos Va	%	3	5	4.75	cumple
VAM	%	14	-	15.28	cumple
VAF	%	65	75	69	cumple
Filler-Betún	-	0.8	1.2	0.4	no

Fuente: Propia

5.2. Análisis de los Resultados Obtenidos

Los valores expuestos en la tabla 5.1 muestran el resultado de la mezcla asfáltica utilizando un porcentaje de cemento asfáltico de 6.33%. Si bien es cierto que la mayoría de valores cumplen de manera satisfactoria los parámetros solicitados, la relación Filler/Betún (0.4) se encuentra por debajo de los límites (0.8 – 1.2).

Al ser la relación entre el material que pasa el tamiz No. 200 y el porcentaje de cemento asfáltico, el valor de 0.4 significa que existe poco material filler para el diseño en cuestión. Si bien es cierto que la mezcla en conjunto tiene un buen desempeño, una baja relación Filler/Betún implica la presencia de aire dentro de la mezcla asfáltica, razón por la cual los vacíos de aire (4.75%) tienen un valor cercano al límite superior (5%).

La escasa presencia de material filler en el diseño puede estar relacionado con el origen del material, ya que un agregado con alto grado de dureza no genera tanto desprendimiento de partículas finas en su proceso de trituración; esto se puede comprobar con los resultados de la tabla 4.3, en donde la abrasión en la Máquina de los Ángeles tiene un valor de 27%, muy por debajo del límite de 40%. Lo cual a su vez explicaría la relación con el resultado de estabilidad obtenido (3367 lbf), el cual se encuentra por encima del límite solicitado (2200 lbf).

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. El material granular analizado es de alta dureza, debido a su bajo porcentaje de abrasión y alto grado de estabilidad, pese a requerir mayor porcentaje de material fino que pase el tamiz No. 200.
2. Se concluye que la deficiencia del material que pasa el tamiz No. 200 se traduce en una relación Filler/Betón baja, por lo que la mezcla asfáltica no puede sellar apropiadamente los espacios vacíos entre las partículas de los agregados minerales.
3. Si bien es cierto que la mezcla asfáltica trabaja apropiadamente en conjunto, es importante considerar que la carencia de filler puede derivar en problemas de durabilidad a largo plazo, como por ejemplo la presencia de fisuras en la estructura.
4. La interacción mecánica de agregados minerales gruesos y finos trabaja de manera satisfactoria en la mezcla, ya que la correcta posición y trabazón de los mismos permite una buena capacidad de resistencia a las cargas de tráfico, esto se puede comprobar en el

resultado de estabilidad del ensayo Marshall. Por lo cual, la mezcla es apropiada para un diseño de tráfico pesado.

5. El contenido óptimo de asfalto permite un equilibrio entre la resistencia a la deformación por cargas externas junto con la resistencia al envejecimiento y duración de la mezcla asfáltica, permitiendo así cumplir con los parámetros establecidos por la normativa vigente.

Recomendaciones

1. Para mejorar la relación F/B, se recomienda la implementación de filler externo tal como Cemento Portland o Cal, en un rango de 2 a 3% en función al peso total de los agregados, de modo tal que todos los valores se encuentren dentro de los rangos establecidos anteriormente.
2. Es recomendable realizar un reajuste en cuanto a la dosificación de los agregados finos para así aumentar la cantidad de material que pasa el tamiz No. 200, lo que a su vez implica un aumento en la viscosidad de la mezcla y por lo tanto, una reducción en los vacíos de aire.
3. La temperatura juega un papel importante dentro del comportamiento de la mezcla asfáltica, por lo que se recomienda mantener un control continuo en las etapas de mezclado, extensión y compactación de la capa de rodadura, para así garantizar un comportamiento óptimo de la misma.

REFERENCIAS

- Asphalt Institute. (2007). The Asphalt Institute (Manual Series No. 4 [MS-4]; 7th ed.). Asphalt Institute.
- ASTM International. (2001). Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate (Standard No. C127-01).
- ASTM International. (2006). Standard test method for penetration of bituminous materials (Standard No. D5-06)
- ASTM International. (2009). Standard specification for penetration-graded asphalt cement for use in pavement construction (Standard No. D946/D946M)
- ASTM International. (2009). Standard specification for viscosity-graded asphalt cement for use in pavement construction (Standard No. D3381-09).
- ASTM International. (2015). Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures (ASTM D6927-15).
- ASTM International. (2015). Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer (ASTM D4402/D4402M-15).
- ASTM International. (2017). Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials (ASTM D113-17).

ASTM International. (2018). Standard Test Method for Density of Semi-Solid Asphalt Binder (Pycnometer Method) (ASTM D70-18)

ASTM International. (2022). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate (ASTM C128-22).

ASTM International. (2022). Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate (ASTM D2419-22).

EP Petroecuador. (2013). El petróleo en el Ecuador: La nueva era petrolera.

<https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/03/El-Petr%C3%B3leo-en-el-Ecuador-La-Nueva-Era.pdf>

Garnica, P., Pérez, A., & Gómez, J. A. (2005). Evaluación de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas (Publicación Técnica No. 267). Instituto Mexicano del Transporte.

<https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt267.pdf>

Ministerio de Obras Públicas. (2002). Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes (MOP-001 F-2002). Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2013). Norma ecuatoriana vial NEVI-12: Volumen 3

Padilla, A. (2014). Diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall [Tesis de grado, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCommons.

<https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/d76c4e7e-543d-4fe1-8de5-b2d3c6620d14/content>

- Pipintakos, G., Sreeram, A., Mirwald, J., & Bhasin, A. (2024). Engineering bitumen for future asphalt pavements: A review of chemistry, structure and rheology. *Materials & Design*, 244, 113157. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113157>
- Roberts, F., L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D.-Y., & Kennedy, T. W. (1996). Hot-mix asphalt materials, mixture design, and construction (2nd ed.). National Asphalt Pavement Association.
- Rodríguez, F., Díaz, B. (2021). Relación Filler/Betún. [Tesis de grado, Universidad Tecnológica Metropolitana].
- Rodríguez, M. (2025). Tipos de asfalto: composición y propiedades. <https://inspenet.com/articulo/tipos-de-asfalto-composicion-y-popiedades/>
- Salgado, J., Fernández, M., Fuentes, R., Zuñiga, R., Muñoz, G. (2025). Manual de carreteras: Volumen 4. Ministerio de Obras Públicas de Chile.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2015). Características de los Materiales: Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas.
- Sequeira, W., Cervantes, V. (2015). Consistencia de los Diseños de Mezcla según la Metodología Marshall. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos de Estructuras Universidad de Costa Rica.

ANEXO A. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

ÁREA DE PAVIMENTOS

INFORME DE ENSAYO

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

CALCULO : Jhovanny Muñoz

Nº DE RECEPCIÓN : P 4082

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO PARA LAS BRIQUETAS

Masa seca 1100,00

TAMIZ N°	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO	PESO RET. ACUM.	% RETENIDO	% PASA
2"	50,00	0,0	0,00	0,00	100,0
1 1/2"	37,50	0,0	0,00	0,00	100,0
1"	25,00	0,0	0,00	0,00	100,0
3/4"	19,00	1,7	1,65	0,15	99,9
1/2"	12,50	133,9	135,6	12,3	87,7
3/8"	9,50	226,1	361,6	32,9	67,1
4	4,75	262,4	624,0	56,7	43,3
8	2,36	77,8	701,8	63,8	36,2
16	1,18	77,6	779,4	70,9	29,2
30	0,600	76,2	855,5	77,8	22,2
50	0,300	100,1	955,7	86,9	13,1
100	0,150	68,2	1.023,8	93,1	6,9
200	0,075	41,5	1.065,4	96,9	3,2
PASA N° 200		34,7	1.100,0		

AGREGADO A	AGREGADO B	AGREGADO C
PORCENTAJES DE MEZCLAS		
50%	25%	25%
550	275,0	275,0

DISEÑO N° 2 Tres materiales

TAMIZ N°	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO	PESO RET. ACUM.	PESO RET. ACUM.
2"	50,00	0,0	0,0	0,0
1 1/2"	37,50	0,0	0,0	0,0
1"	25,00	0,0	0,0	0,0
3/4"	19,00	0,0	0,0	1,6
1/2"	12,50	0,0	10,5	123,5
3/8"	9,50	0,0	101,2	124,9
4	4,75	77,1	161,1	24,1
8	2,36	77,1	0,4	0,3
16	1,18	77,2	0,1	0,0
30	0,600	76,0	0,1	0,0
50	0,300	100,0	0,2	0,0
100	0,150	67,7	0,2	0,1
200	0,075	40,8	0,8	0,2
Pasa Tamiz N° 200		34,1	0,3	0,1

Porcentajes de Asfalto %	Peso Asfalto gramos (briquetas)	Peso Asfalto gramos (RICE)
6,5	71,5	143
6,0	66,0	132
5,5	60,5	121
5,0	55,0	110
4,5	49,5	99

ÁREA DE PAVIMENTOS
INFORME DE ENSAYO
DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

CALCULO : Jhovanny Muñoz

Nº DE RECEPCIÓN : P 4082

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO PARA LAS BRIQUETAS

Masa seca 2200,00

TAMIZ N°	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO	PESO RET. ACUM.	% RETENIDO	% PASA
2"	50,00	0,0	0,00	0,00	100,0
1 1/2"	37,50	0,0	0,00	0,00	100,0
1"	25,00	0,0	0,00	0,00	100,0
3/4"	19,00	3,3	3,30	0,15	99,9
1/2"	12,50	267,9	271,2	12,3	87,7
3/8"	9,50	452,1	723,3	32,9	67,1
4	4,75	524,7	1.248,0	56,7	43,3
8	2,36	155,7	1.403,6	63,8	36,2
16	1,18	155,1	1.558,7	70,9	29,2
30	0,600	152,4	1.711,1	77,8	22,2
50	0,300	200,3	1.911,3	86,9	13,1
100	0,150	136,3	2.047,7	93,1	6,9
200	0,075	83,0	2.130,7	96,9	3,2
PASA N° 200		69,3	2.200,0		

AGREGADO A	AGREGADO B	AGREGADO C
PORCENTAJES DE MEZCLAS		
50%	25%	25%
1100	550,0	550,0

DISEÑO N° 2 Tres materiales

TAMIZ N°	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO	PESO RET. ACUM.	PESO RET. ACUM.
2"	50,00	0,0	0,0	0,0
1 1/2"	37,50	0,0	0,0	0,0
1"	25,00	0,0	0,0	0,0
3/4"	19,00	0,0	0,0	3,2
1/2"	12,50	0,0	21,0	247,1
3/8"	9,50	0,0	202,5	249,8
4	4,75	154,1	322,2	48,3
8	2,36	154,1	0,8	0,5
16	1,18	154,5	0,2	0,1
30	0,600	151,9	0,3	0,1
50	0,300	200,1	0,3	0,1
100	0,150	135,4	0,4	0,1
200	0,075	81,6	1,5	0,5
Pasa Tamiz N° 200		68,2	0,7	0,3

Porcentajes de Asfalto %	Peso Asfalto gramos (briquetas)	Peso Asfalto gramos (RICE)
6,5	71,5	143
6,0	66,0	132
5,5	60,5	121
5,0	55,0	110
4,5	49,5	99

ANEXO B. DESCRIPCIÓN BRIQUETAS

PROYECTO:
RECEPCIÓN:
HOJA:

AREA DE PAVIMENTOS
FORMATO DE CAMPO
Gravedad específica Bulk de mezclas asfálticas en caliente compactadas (HMA) usando especímenes SSS
Método de Ensayo Normalizado para Estabilidad y Flujo de Mezclas Bituminosas

Briquetas / Muecho	Descripción	Espesor del especimen (mm)	Diámetro del especimen (mm)	Peso en aire (gr)	Peso en agua (gr)	Peso sat. sup.seca (gr)	D. Bulk g/cm ³	Volumen Briquetas Vol.	Gmm/cm ³	Vacios, aire, %	Medida	Estabilidad (lb) F Corre:	Corregida	Flujo 0.075"
1	4,5	59,86	94,35	1141,30	622,20	1146,00	2,20		9,68	9,55				
2	5,0	59,03	94,61	1146,00	625,32	1149,83	2,18		9,65	9,50				
3	5,5	59,02	94,57	1150,62	639,65	1155,59	2,13		9,62	9,47				
4	6,0	59,83	94,53	1158,01	645,45	1164,10	2,13		9,61	9,46				
5	6,5	59,35	94,44	1163,19	646,35	1166,52	2,04		9,61	9,49				
6	4,5	67,20	101,56	1136,84	623,22	1145,40								
7	4,5	65,85	101,62	1143,03	628,66	1148,37								
8	5,0	65,64	101,63	1146,52	635,90	1153,18								
9	5,0	65,85	101,60	1145,09	637,13	1150,83								
10	5,5	66,16	101,51	1153,49	642,05	1160,70								

Laboratoria

AREA DE PAVIMENTOS
FORMATO DE CAMPO
 Gravedad especifica Bulk de mezclas asfálticas en caliente compactadas (HMA) usando especímenes SSS
 Método de Ensayo Normalizado para Estabilidad y Flujo de Mezclas Bituminosas

PROYECTO:
 RECEPCION:
 HOJA:

Briqueña / Núcleo	Descripción	Espesor del especimen (mm)	Diámetro del especimen (mm)	Peso en aire (gr)	Peso en agua (gr)	Peso sat. sup. seca (gr)	D. Bulk g/cm ³	Volumen Briqueña Vol.	Gmm/cm ³	Vacios. aire. %	Medida	Estabilidad (lb) F Corre.	Corregida	Flujo 0.075"
11	5,5	65,29	101,43	1147,80	637,92	1152,40								
12	6,0	65,60	101,62	1155,29	645,32	1160,35								
13	6,0	65,08	101,83	1160,69	648,10	1163,83								
14	6,5	64,91	101,60	1156,21	647,68	1158,92								
15	6,5	65,28	101,56	1166,21	657,37	1167,47								

ANEXO C. ENSAYO RICE

ÁREA DE PAVIMENTOS DATOS DE ENSAYO

GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN

RECEPCIÓN N°: FECHA DE ENSAYO:

NORMA DE REFERENCIA:

ID. MUESTRA: ORIGEN DE LA MUESTRA:

HOJA:

Información general del ensayo:

Número de muestras	
Tipo de contenedor	Metálico
Tipo de procedimiento	En aire

Registros de la muestra:

Masa de muestra seca en aire (A), g	2233,2
Masa de contenedor y tapa con agua a 25 °C (D), g	7419,4
Masa de contenedor, tapa, muestra y agua a 25 °C (E), g	8743,6
Procedimiento suplementario	

• CALIBRACIÓN PICO METRO

Registros del procedimiento suplementario:

Masa de la bandeja, g	
Masa de bandeja y muestra húmeda, g	

Ciclo	Masa, g	Diferencia, %
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		

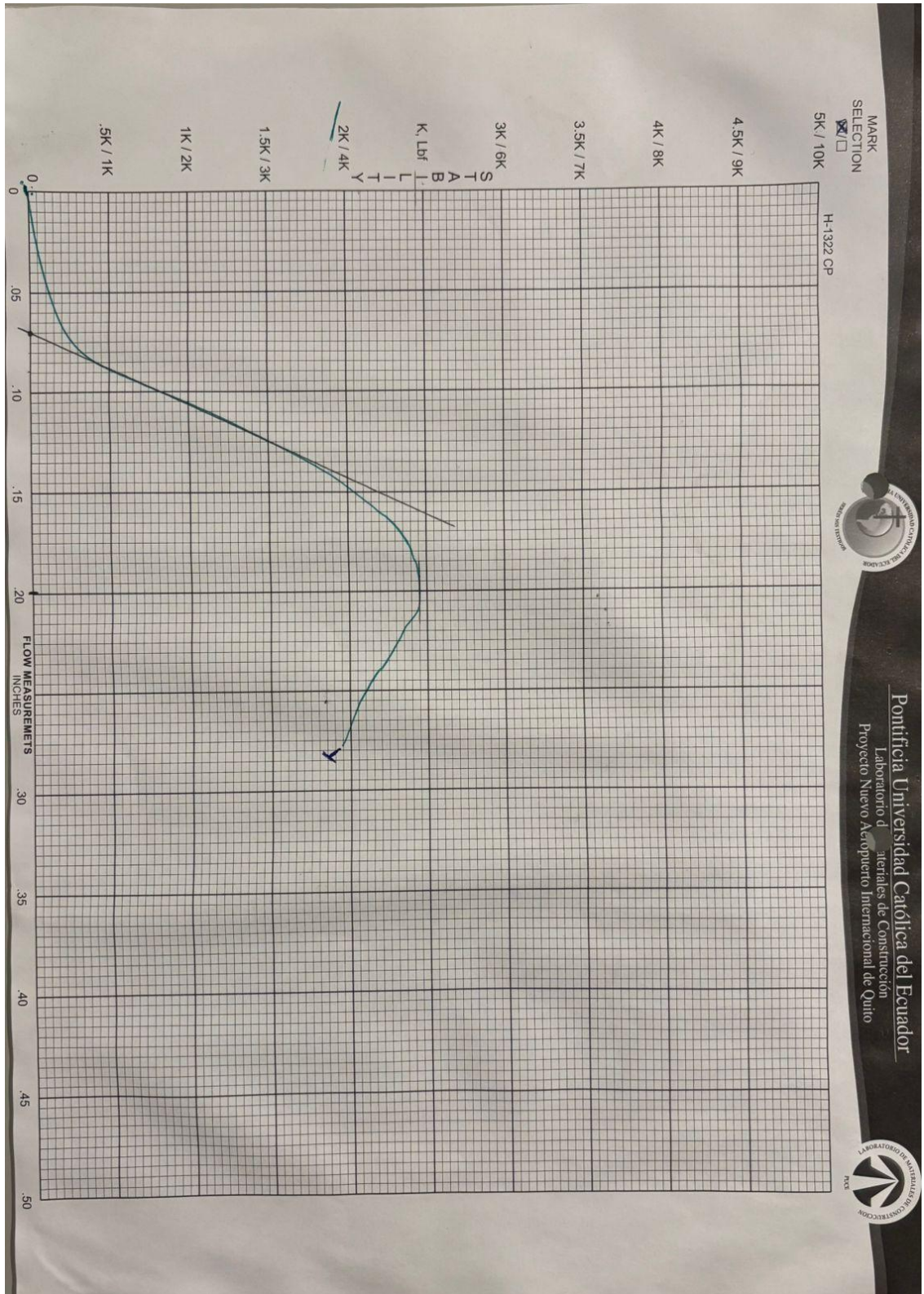
Masa de la muestra con superficie seca (A), g	
---	--

Gravedad específica máxima teórica (Gmm)	2,41
--	------

OBSERVACIONES:

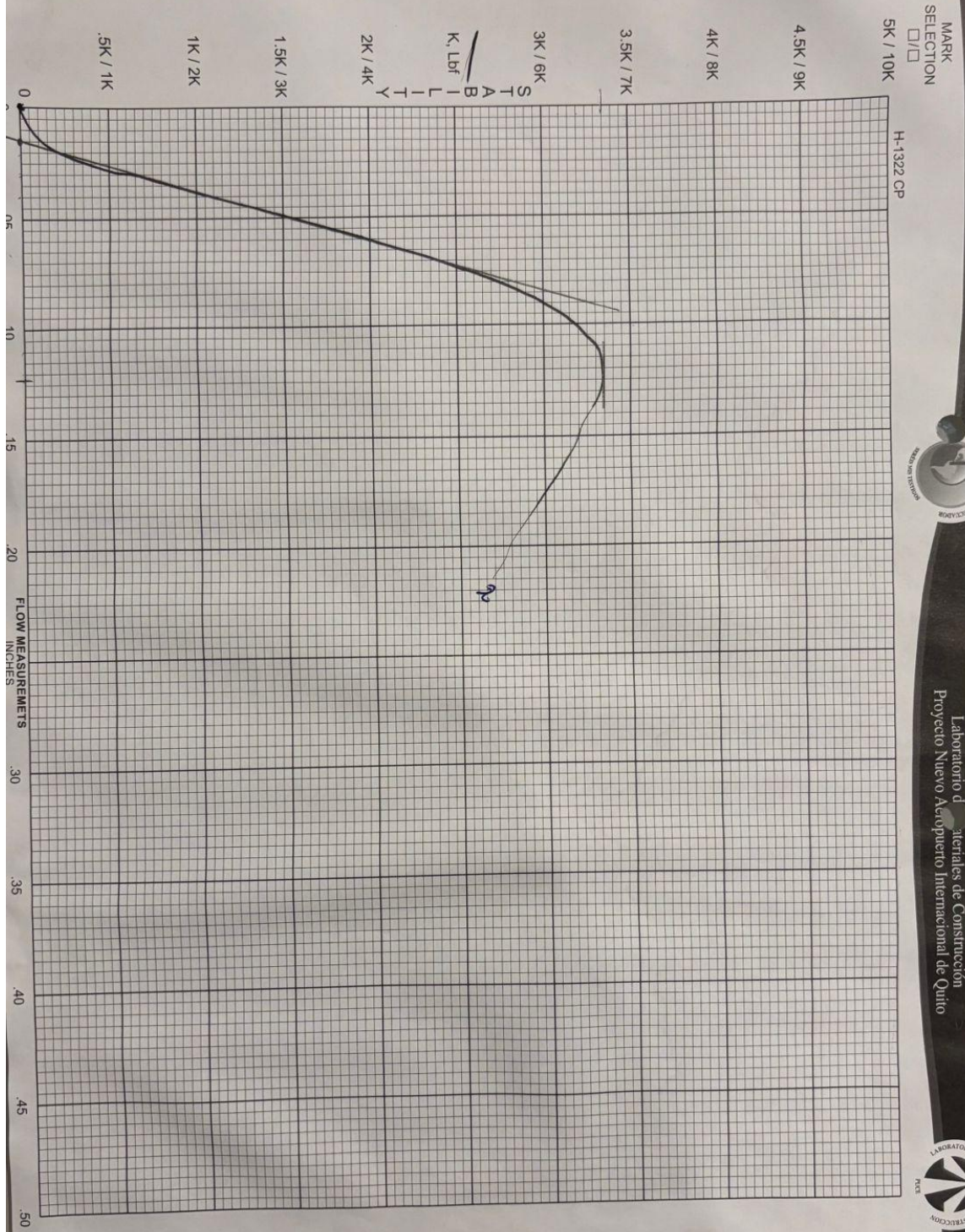
Responsable de ensayo

ANEXO D. ESTABILIDAD Y FLUJO





Pontificia Universidad Católica del Ecuador
Laboratorio de Materiales de Construcción
Proyecto Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito

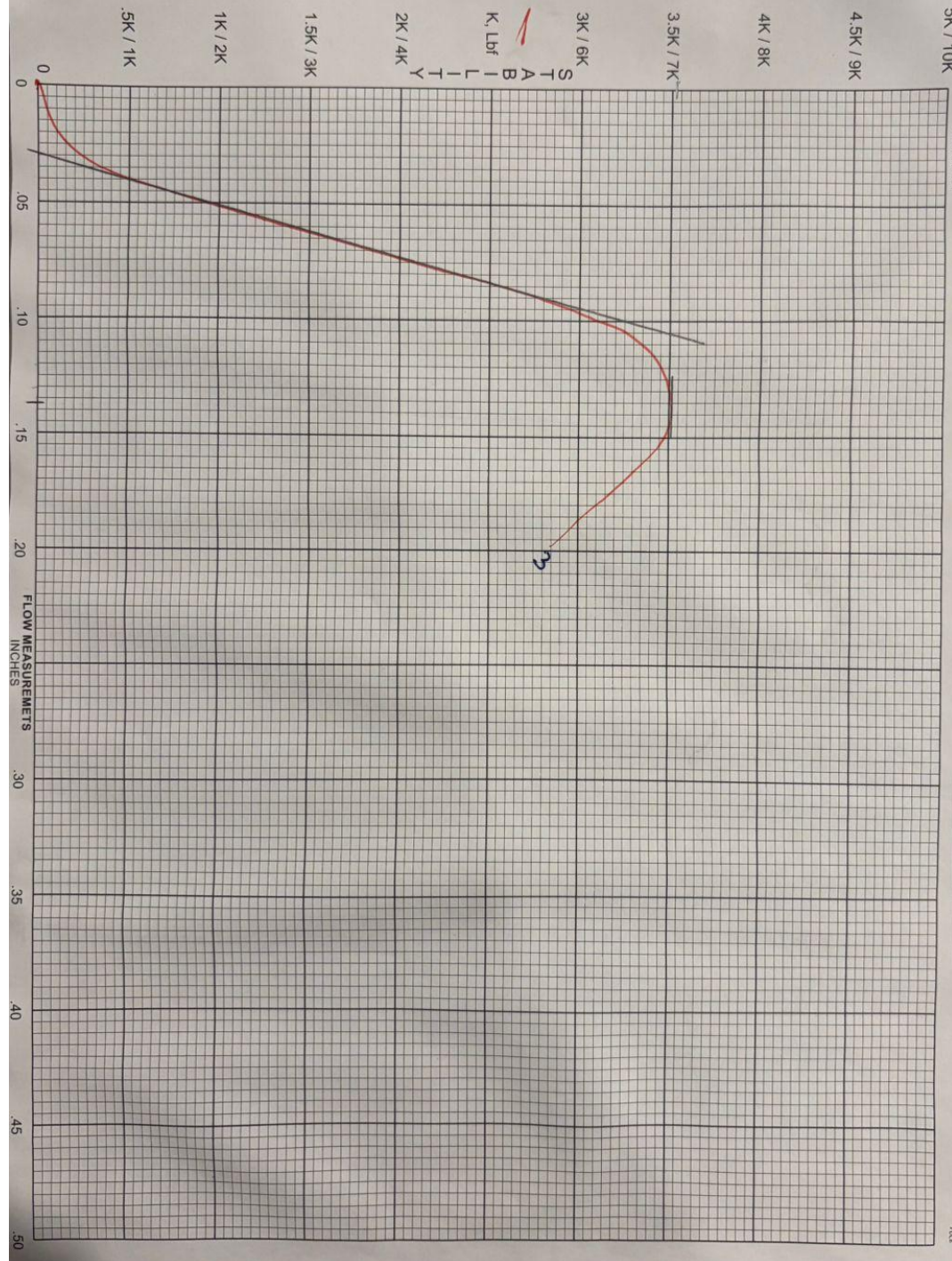


MARK SELECTION
5K / 10K

H-1322 GP

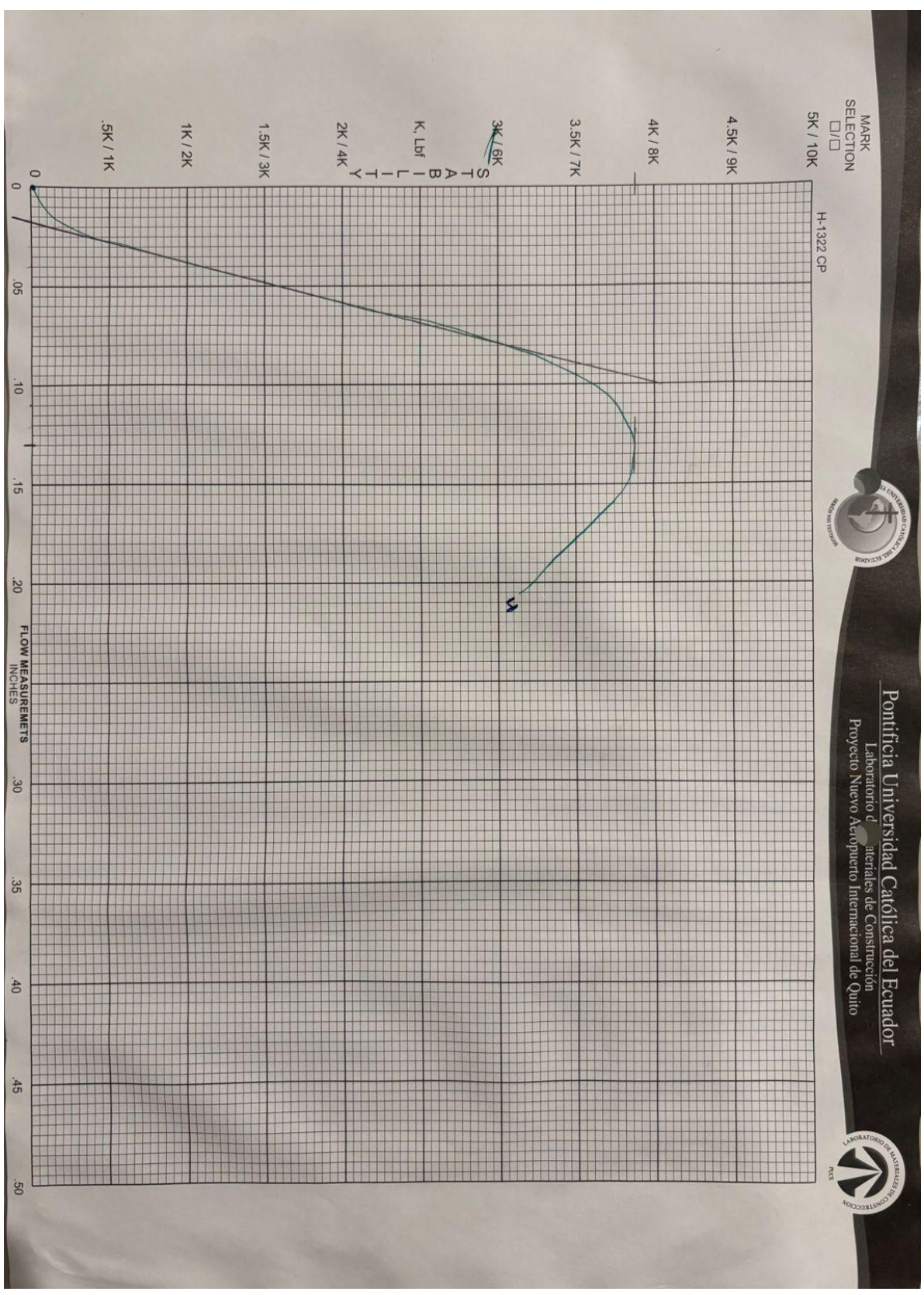


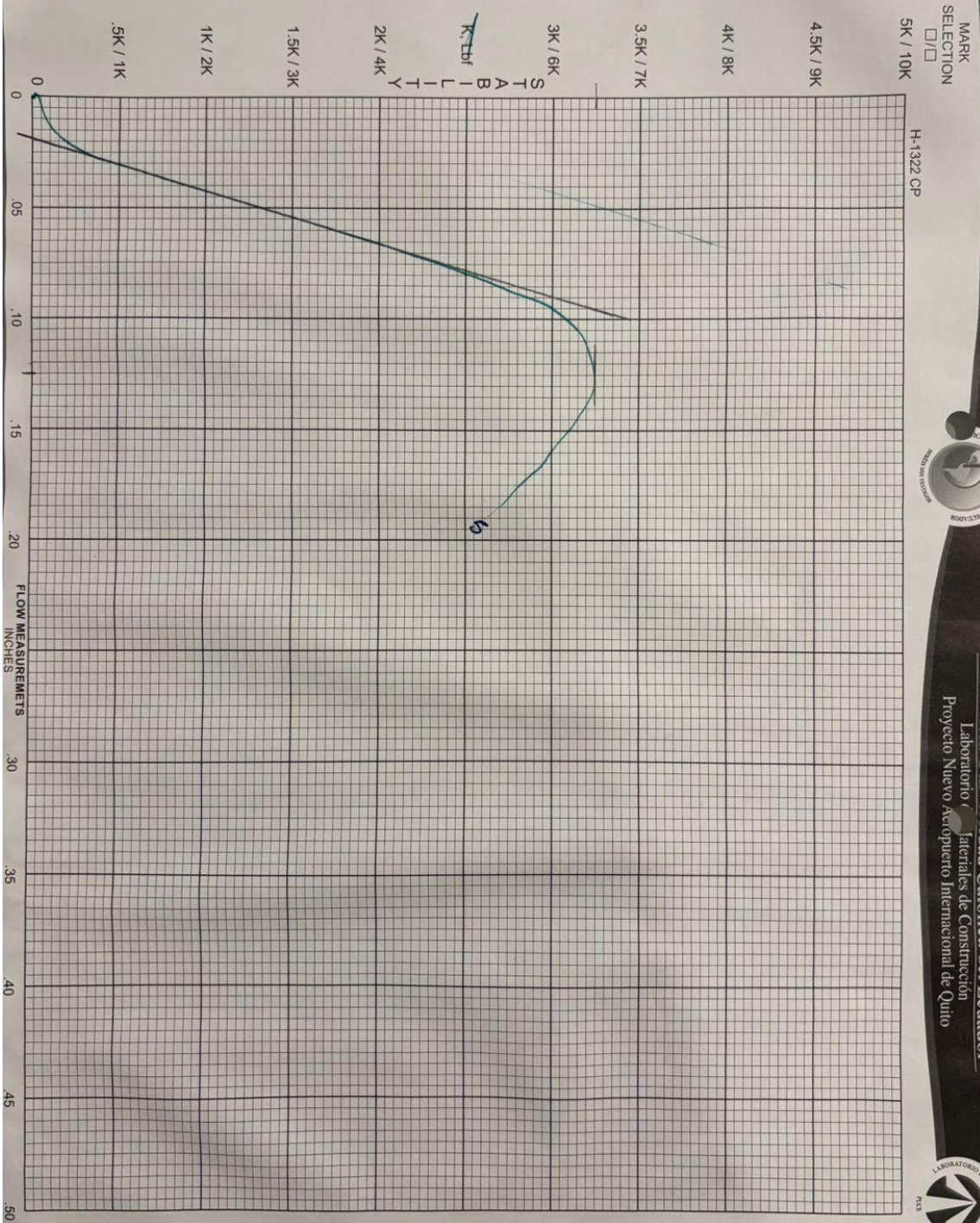
Pontificia Universidad Católica del Ecuador
Laboratorio de Materiales de Construcción
Proyecto Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito





Pontificia Universidad Católica del Ecuador
Laboratorio de Materiales de Construcción
Proyecto Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito





MARK SELECTION



H-1322 CP



Pontificia Universidad Católica del Ecuador
Laboratorio de Materiales de Construcción
Proyecto Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito

